

ALTAIR

ONLY FORWARD

Altair Radioss 2022

ユーザーガイド

更新: 08/31/2022

altair.com

目次

Intellectual Property Rights Notice	iv
Technical Support	viii
ユーザーガイド.....	10
Radiossの実行.....	11
解析プロセス.....	27
複数コアの使用.....	29
高度なテクニック.....	31
陽解法構造有限要素解析.....	35
時間ステップ.....	35
有限要素.....	76
モデル化のツール.....	146
材料.....	157
破壊.....	214
複合材.....	239
結合.....	279
運動学的拘束.....	296
インターフェース.....	313
荷重.....	340
エアバッグのモデル化.....	344
デバッグのガイドライン.....	394
Appendix.....	412
陰解法構造有限要素解析.....	415
陰解法の機能と互換性.....	416
陰解法解析のアクティブ化.....	419
陰解法ソルバー.....	421
RadiossとAcuSolveを用いた流体-構造相互作用解析.....	423
準-静的解析の注記事項.....	432
非線形陰解法解析の注記事項.....	433
RadiossとAcuSolveを用いた流体-構造相互作用解析.....	436
出力メッセージ.....	438
トラブルシューティング.....	440
Appendix.....	442
流体と流体-構造シミュレーション.....	444
ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian)とCFD(Computational Fluid Dynamics).....	444
粒子法流体力学(SPH).....	471
SPHセルの分布.....	471
保存される隣接要素の最大数.....	474
SPH対称条件.....	475
Solid to SPHオプション(Sol2SPH).....	480
マルチドメインテクニック.....	485
理論的な速度上昇.....	486
モデルの設定.....	487

単一入力ファイルフォーマット.....	489
複数入力ファイルフォーマット.....	497
設計最適化.....	506
インプリメンテーション.....	506
エラーメッセージデータベース.....	511
Engineのエラーメッセージ.....	522
警告メッセージデータベース.....	528
索引.....	531

Intellectual Property Rights Notice

Copyright © 1986-2022 Altair Engineering Inc. All Rights Reserved.

This Intellectual Property Rights Notice is exemplary, and therefore not exhaustive, of intellectual property rights held by Altair Engineering Inc. or its affiliates. Software, other products, and materials of Altair Engineering Inc. or its affiliates are protected under laws of the United States and laws of other jurisdictions. In addition to intellectual property rights indicated herein, such software, other products, and materials of Altair Engineering Inc. or its affiliates may be further protected by patents, additional copyrights, additional trademarks, trade secrets, and additional other intellectual property rights. For avoidance of doubt, copyright notice does not imply publication. Copyrights in the below are held by Altair Engineering Inc. except where otherwise explicitly stated. Additionally, all non-Altair marks are the property of their respective owners.

This Intellectual Property Rights Notice does not give you any right to any product, such as software, or underlying intellectual property rights of Altair Engineering Inc. or its affiliates. Usage, for example, of software of Altair Engineering Inc. or its affiliates is governed by and dependent on a valid license agreement.

Altair Simulation Products

Altair® AcuSolve® ©1997-2022

Altair Activate® ©1989-2022

Altair® BatteryDesigner™ ©2019-2022

Altair Compose® ©2007-2022

Altair® ConnectMe™ ©2014-2022

Altair® EDEM™ ©2005-2022 Altair Engineering Limited, ©2019-2022 Altair Engineering Inc.

Altair® ElectroFlo™ ©1992-2022

Altair Embed® ©1989-2022

Altair Embed® SE ©1989-2022

Altair Embed®/Digital Power Designer ©2012-2022

Altair Embed® Viewer ©1996-2022

Altair® ESAComp® ©1992-2022

Altair® Feko® ©1999-2022 Altair Development S.A. (Pty) Ltd., ©1999-2022 Altair Engineering Inc.

Altair® Flow Simulator™ ©2016-2022

Altair® Flux® ©1983-2022

Altair® FluxMotor® ©2017-2022

Altair® HyperCrash® ©2001-2022

Altair® HyperGraph® ©1995-2022

Altair® HyperLife® ©1990-2022

Altair® HyperMesh® ©1990-2022

Altair® HyperStudy® ©1999-2022

Altair® HyperView® ©1999-2022

Altair® HyperWorks® ©1990-2022
Altair® HyperXtrude® ©1999-2022
Altair® Inspire™ ©2009-2022
Altair® Inspire™ Cast ©2011-2022
Altair® Inspire™ Extrude Metal ©1996-2022
Altair® Inspire™ Extrude Polymer ©1996-2022
Altair® Inspire™ Form ©1998-2022
Altair® Inspire™ Friction Stir Welding ©1996-2022
Altair® Inspire™ Mold ©2009-2022
Altair® Inspire™ PolyFoam ©2009-2022
Altair® Inspire™ Play ©2009-2022
Altair® Inspire™ Print3D ©2022
Altair® Inspire™ Render ©1993-2016 Solid Iris Technologies Software Development One PLLC, ©2016-2022 Altair Engineering Inc
Altair® Inspire™ Resin Transfer Molding ©1990-2022
Altair® Inspire™ Studio ©1993-2022
Altair® Material Data Center™ ©2019-2022
Altair® MotionSolve® ©2002-2022
Altair® MotionView® ©1993-2022
Altair® Multiscale Designer® ©2011-2022
Altair® nanoFluidX® ©2013-2022 FluiDyna GmbH, ©2018-2022 Altair Engineering Inc.
Altair® OptiStruct® ©1996-2022
Altair® PolIEx™ ©2003-2022
Altair® Pulse™ ©2020-2022
Altair® Radioss® ©1986-2022
Altair® SEAM® ©1985-2019 Cambridge Collaborative, Inc., ©2019-2022 Altair Engineering Inc.
Altair® SimLab® ©2004-2022
Altair® SimSolid® ©2015-2022
Altair® ultraFluidX® ©2010-2022 FluiDyna GmbH, ©2018-2022 Altair Engineering Inc.
Altair® Virtual Wind Tunnel™ ©2012-2022
Altair® WinProp™ ©2000-2022
Altair® WRAP™ ©1998-2022 Altair Engineering AB
Altair® S-FRAME® ©1995-2022 Altair Engineering Canada, Ltd., ©2021-2022 Altair Engineering Inc.
Altair® S-STEEL™ ©1995-2022 Altair Engineering Canada, Ltd., ©2021-2022 Altair Engineering Inc.
Altair® S-PAD™ ©1995-2022 Altair Engineering Canada, Ltd., ©2021-2022 Altair Engineering Inc.

Altair® S-CONCRETE™ ©1995-2022 Altair Engineering Canada, Ltd., ©2021-2022 Altair Engineering Inc.

Altair® S-LINE™ ©1995-2022 Altair Engineering Canada, Ltd., ©2021-2022 Altair Engineering Inc.

Altair® S-TIMBER™ ©1995-2022 Altair Engineering Canada, Ltd., ©2021-2022 Altair Engineering Inc.

Altair® S-FOUNDATION™ ©1995-2022 Altair Engineering Canada, Ltd., ©2021-2022 Altair Engineering Inc.

Altair® S-CALC™ ©1995-2022 Altair Engineering Canada, Ltd., ©2021-2022 Altair Engineering Inc.

Altair Packaged Solution Offerings (PSOs)

Altair® Automated Reporting Director™ ©2008-2022

Altair® e-Motor Director™ ©2019-2022

Altair® Geomechanics Director™ ©2011-2022

Altair® Impact Simulation Director™ ©2010-2022

Altair® Model Mesher Director™ ©2010-2022

Altair® NVH Director™ ©2010-2022

Altair® Squeak and Rattle Director™ ©2012-2022

Altair® Virtual Gauge Director™ ©2012-2022

Altair® Weld Certification Director™ ©2014-2022

Altair® Multi-Disciplinary Optimization Director™ ©2012-2022

Altair HPC & Cloud Products

Altair® PBS Professional® ©1994-2022

Altair® Control™ ©2008-2022

Altair® Access™ ©2008-2022

Altair® Accelerator™ ©1995-2022

Altair® Accelerator™ Plus ©1995-2022

Altair® FlowTracer™ ©1995-2022

Altair® Allocator™ ©1995-2022

Altair® Monitor™ ©1995-2022

Altair® Hero™ ©1995-2022

Altair® Software Asset Optimization (SAO) ©2007-2022

Altair Mistral™ ©2022

Altair Drive ©2021-2022

Altair® Grid Engine® ©2001, 2011-2022

Altair® DesignAI™ ©2022

Altair Breeze™ ©2022

Altair Data Analytics Products

Altair® Knowledge Studio® ©1994-2022 Altair Engineering Canada, Ltd., ©2018-2022 Altair Engineering Inc.

Altair® Knowledge Studio® for Apache Spark ©1994-2022 Altair Engineering Canada, Ltd., ©2018-2022 Altair Engineering Inc.

Altair® Knowledge Seeker™ ©1994-2022 Altair Engineering Canada, Ltd., ©2018-2022 Altair Engineering Inc.

Altair® Knowledge Hub™ ©2017-2022 Datawatch Corporation, ©2018-2022 Altair Engineering Inc.

Altair® Monarch® ©1996-2022 Datawatch Corporation, ©2018-2022 Altair Engineering Inc.

Altair® Panopticon™ ©2004-2022 Datawatch Corporation, ©2018-2022 Altair Engineering Inc.

Altair® SmartWorks™ ©2021-2022

Altair SmartCore™ ©2011-2022

Altair SmartEdge™ ©2011-2022

Altair SmartSight™ ©2011-2022

Altair One™ ©1994-2022

2022

January 10, 2022

Technical Support

Altair provides comprehensive software support via web FAQs, tutorials, training classes, telephone, and e-mail.

Altair One Customer Portal

Altair One (<https://altairone.com/>) is Altair's customer portal giving you access to product downloads, a Knowledge Base, and customer support. We recommend that all users create an Altair One account and use it as their primary portal for everything Altair.

When your Altair One account is set up, you can access the Altair support page via this link: www.altair.com/customer-support/

Altair Community

Participate in an online community where you can share insights, collaborate with colleagues and peers, and find more ways to take full advantage of Altair's products.

Visit the Altair Community (<https://community.altair.com/community>) where you can access online discussions, a knowledge base of product information, and an online form to contact Support. These valuable resources help you discover, learn and grow, all while having the opportunity to network with fellow explorers like yourself.

Altair Training Classes

Altair's in-person, online, and self-paced trainings provide hands-on introduction to our products, focusing on overall functionality. Trainings are conducted at our corporate and regional offices or at your facility.

For more information visit: <https://learn.altair.com/>

If you are interested in training at your facility, contact your account manager for more details. If you do not know who your account manager is, contact your local support office and they will connect you with your account manager.

Telephone and E-mail

If you are unable to contact Altair support via the customer portal, you may reach out to technical support via phone or e-mail. Use the following table as a reference to locate the support office for your region.

When contacting Altair support, specify the product and version number you are using along with a detailed description of the problem. It is beneficial for the support engineer to know what type of workstation, operating system, RAM, and graphics board you have, so include that in your communication.

Location	Telephone	E-mail
Australia	+61 3 9866 5557	anzsupport@altair.com
Brazil	+55 113 884 0414	br_support@altair.com
Canada	+1 416 447 6463	support@altairengineering.ca
China	+86 400 619 6186	support@altair.com.cn

Location	Telephone	E-mail
France	+33 141 33 0992	francesupport@altair.com
Germany	+49 703 162 0822	hwsupport@altair.de
Greece	+30 231 047 3311	eesupport@altair.com
India	+91 806 629 4500 +1 800 425 0234 (toll free)	support@india.altair.com
Israel		israelsupport@altair.com
Italy	+39 800 905 595	support@altairengineering.it
Japan	+81 3 6225 5830	support@altairjp.co.jp
Malaysia	+60 32 742 7890	aseansupport@altair.com
Mexico	+52 55 5658 6808	mx-support@altair.com
New Zealand	+64 9 413 7981	anzsupport@altair.com
South Africa	+27 21 831 1500	support@altair.co.za
South Korea	+82 704 050 9200	support@altair.co.kr
Spain	+34 910 810 080	support-spain@altair.com
Sweden	+46 46 460 2828	support@altair.se
United Kingdom	+44 192 646 8600	support@uk.altair.com
United States	+1 248 614 2425	hwsupport@altair.com

If your company is being serviced by an Altair partner, you can find that information on our web site at <https://www.altair.com/PartnerSearch/>.

See www.altair.com for complete information on Altair, our team, and our products.

内容：

- [Radiossの実行](#) (ページ 11)
- [陽解法構造有限要素解析](#) (ページ 35)
- [陰解法構造有限要素解析](#) (ページ 415)
- [流体と流体-構造シミュレーション](#) (ページ 444)
- [粒子法流体力学\(SPH\)](#) (ページ 471)
- [マルチドメインテクニック](#) (ページ 485)
- [設計最適化](#) (ページ 506)
- [エラーメッセージデータベース](#) (ページ 511)
- [Engineのエラーメッセージ](#) (ページ 522)
- [警告メッセージデータベース](#) (ページ 528)

Radiossの実行

Radiossソルバーは、ここで説明するさまざまな方法で実行することができます。

Altair Compute Console (ACC)から

Altair Compute Console (ACC)は、Radioss計算を起動する最も簡単な方法です。

入力ファイルの選択、実行オプションの定義、キューを使った複数ソルバーの実行、遅延のスケジューリング、ジョブの停止などのための対話型GUIを備え、実行に必要なすべての環境変数があらかじめ定義されています。

Windowsでは、Compute Console (ACC)は、**Start > 2022 > Compute Console**を選択することで起動できます。

Compute Console (ACC)は、ソフトウェア内から**Help > Compute Console Manual**を選択することで起動できます。

すべてのプラットフォーム上で、次のようにコマンド行からこのユーティリティを起動できます

Linux `<install_dir>/altair/scripts/radioss -gui`

Windows `<install_dir>/hwsolvers/scripts/radioss.bat -gui`

入力ファイル名

入力ファイル名に基づき、Compute Console (ACC)は、StarterまたはEngineを実行すべきかを自動的に検知します。

- デフォルトでは、入力ファイルのディレクトリ内のすべてのStarterおよびEngineファイルが実行されます。複数のEngineファイルは、Starterファイルと同じディレクトリに置くことによって容易に実行できます。
- Engineファイルが選択されている場合、そのEngineファイルが実行された後、続けてディレクトリ内のその他のEngineファイルも実行されます。
- `-onestep`オプションが使用されている場合、選択された入力ファイルのみが実行されます。入力ファイルがStarterファイルの場合、Starterのみが実行され、入力ファイルがEngineファイルの場合はEngineファイルのみが実行されます。

一般的に使用される実行時のオプション

オプション	引数	内容
<code>-onestep</code>	N/A	次のEngineファイルへの自動継続を無効にし、単一ファイルフォーマットのStarterのみを実行します
<code>-nt</code>	スレッド数	SPMD MPIドメインごとのSMPスレッド数。 (例: <code>radioss ROOTname_0000.rad -nt 2</code>)
<code>-np</code>	SPMD MPIドメインの数	Radioss SPMD MPIドメインの数 (例: <code>radioss ROOTname_0000.rad -np 12</code>)

使用可能なすべての実行時のオプション

スペースまたは特殊文字を含む引数は{ }で囲む必要があります。たとえば:

```
-mpipath {C:/Program Files/MPI}
```

Windowsマシンのファイルパスには、バックスラッシュ"\ "またはスラッシュ"/ "が使用できますが、バックスラッシュ"\ "の使用時は引用符で囲まなくてはなりません。

オプション	引数	内容	利用可能なプラットフォーム
-altver		代替ソルバーバージョンの接尾辞。	すべてのプラットフォーム
-appfile	N/A	SPMD実行用の一部のMPIを含む仕様ファイル。	すべてのプラットフォーム
-args		ソルバーに渡される追加の引数。 例: "\"{-x\} \{-f=C:/file name/path \\}\"	すべてのプラットフォーム
-check		モデルに警告やエラーがないかチェックします。領域分割を無効にし、ファイルの書き込みを再開します。	すべてのプラットフォーム
-checkpoint	N/A	チェックポイントsavefileからRadioss Engineを実行します。	すべてのプラットフォーム
-debug	1, 2	スクリプトのデバッグ情報を出力します。	すべてのプラットフォーム
-delay	秒数	Radioss実行の開始を指定した秒数だけ遅らせます。この機能では、遅延が終了して実行が開始されるまではライセンス、コンピューターメモリ、CPUを消費しません。 このオプションは、その時点で使用できないが前回の実行からまだ解放されていない計算リソースを待つために使用できます。前回の実行がクラッシュした場合、ライセンスはタイムアウト値に応じてライセンスサーバーからロックされたままになっている場合があります。もしくは、メモリがオペレーティングシステムにより保留とされているかもしれません。	すべてのプラットフォーム

オプション	引数	内容	利用可能なプラットフォーム
		<p> 注:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. <code>-delay</code>オプションはその時点でのジョブに適用されます。そのジョブがCompute Console (ACC) のキューにサブミットされると、Compute Console (ACC) がこのジョブを実行用にリリースした後、デレイが開始します。 2. Compute Console (ACC) を使用して実行を開始された場合は、Schedule delayオプションを使ってキューの開始をデレイさせる必要があります。 	
<code>-dylib</code>	FILE	Radiossユーザーサブルーチンのためのダイナミックライブラリの名前を設定します。	すべてのプラットフォーム
<code>-hostfile</code>	TEXT FILE	マルチコンピュータ(ノード)実行用のホストおよびコア数をリストするテキストファイル。正確なフォーマットについてはMPIドキュメントをご参照ください。	すべてのプラットフォーム
<code>-HSTP_READ</code>	NA	<code>hst_input.hstp</code> ファイルを読み込み、入力デックの/ <code>PARAMETER</code> をreadファイルで指定されたものに置き換えます。	すべてのプラットフォーム
<code>-HSTP_WRITE</code>	NA	モデルの/ <code>PARAMETER</code> モデル情報を含む <code><root_name>_0000.rad2hst</code> ファイル出力します。	すべてのプラットフォーム
<code>-mpi</code>	<code>i , pl, ms</code>	<p>マルチプロセッサ (SPMD) 実行に使用するMPIソフトウェアを指定します。</p> <p><code>i</code> Intel MPI</p> <p><code>pl</code> IBM Platform-MPI (以前のHP-MPI)</p> <p><code>ms</code> Microsoft MPI</p>	すべてのプラットフォームがすべてのMPIソフトウェアをサポートするわけではありません。

オプション	引数	内容	利用可能なプラットフォーム
		<p> 注: <code>-mpi</code>に対する引数はオプションです。引数が指定されていない場合、Intel MPIがデフォルトで使用されます。</p>	
<code>-mpipath</code>	DIRECTORY	mpirunが位置するパスを指定します (Altair SimulationにはMPIソフトウェアが含まれているため、これは通常必要ありません)。	すべてのプラットフォーム
<code>-noh3d</code>	N/A	シミュレーションの終了時にRadiossアニメーションファイルからh3dファイルを生成しません。	すべてのプラットフォーム
<code>-norst</code>	N/A	シミュレーションの終了後、すべてのリスタート(*.rst)ファイルを削除します。	すべてのプラットフォーム
<code>-np</code> または <code>-nspmd</code>	SPMD MPIドメインの数	Radioss SPMD MPIドメインの数 例: <code>radioss -np 4 ROOTname_0000.rad</code>	すべてのプラットフォーム
<code>-nt</code> または <code>-nthread</code>	スレッド数	SPMD MPIドメインごとのSMPスレッド数。 例: <code>radioss -i ROOTname_0000.rad -np 4 -nt 2</code>	すべてのプラットフォーム
<code>-nt_r2r</code>		マルチドメインプロセス用のCPUスレッド数。	すべてのプラットフォーム
<code>-onestep</code>	N/A	次のEngineファイルまたはモデルファイルへの自動継続を無効にし、単一ファイルフォーマットのStarterのみを実行します	すべてのプラットフォーム
<code>-outfile</code>	DIRECTORY	StarterとEngineによって作成されるすべてのファイルの出力ディレクトリを指定します。	すべてのプラットフォーム
<code>-radfiles</code>	N/A	現在のフォルダー内のすべてのファイルを検出されたタイプ(Starter/Engine/mod)とともにリストします。	すべてのプラットフォーム
<code>-radopt</code>	.radopt ファイル	OptiStructでRadioss最適化を実行するためのオプション。Radioss入力デッキのための最適化実行の要求を指定します。 <p> 注: 最適化入力をサポートするRadioss Starterと入力ファイルは、<name>.radoptファイルと同じディレクトリに用意する必要があります。</p>	すべてのプラットフォーム

オプション	引数	内容	利用可能なプラットフォーム
		詳細については、 設計最適化 をご参照ください。	
-rseed	seed	オプション値: 節点のランダムノイズのseed 値を設定 ($0 \leq \text{seed} < 1$)。	すべてのプラットフォーム
-rxalea	xalea	節点のランダムノイズをxaleaの値とともにアクティベートします ($xalea \geq 0$)。	すべてのプラットフォーム
-sp	N/A	単精度バージョンのRadiossの実行を指定します。	すべてのプラットフォーム
-v		複数のソルバーがインストールされている場合、必要となるバージョン。指定されていない場合はインストールされている中で最新のバージョンが使用されます。 例: <code>radioss -v 14.0.220</code> <code>ROOTname_0000.rad</code>	すべてのプラットフォーム

ソルバーコントロール

初期のCompute Console (ACC)入力画面で**Use solver control**オプションにチェックが入っている場合、解析が実行を開始した際にソルバービューウィンドウが現れます。これによりユーザーは、オプション (INFO、STOP、KILL、H3D、ANIM、RFILE、CHKP) のうちの1つを選択し、**Send Command**をクリックすることができます。これらのオプションの詳細については、[コントロールファイル\(C-ファイル\)](#)をご参照ください。

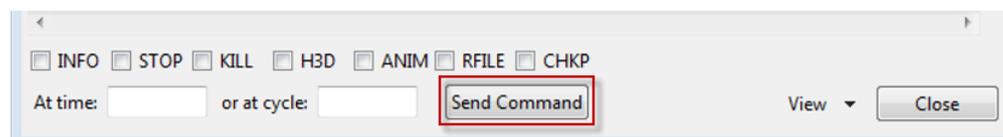


図 1:

注: ANIMまたはH3Dオプションは、現在または指定した時間 / 周期における追加のアニメーションファイルを生成するために使用できます。これは、シミュレーションの状態を確認したい際に非常に役立ちます。STOPオプションは解析を停止し、後ほど解の継続に使用できるリスタートファイルを生成します。

Altair Simulationスクリプトから

HyperWorksに含まれるスクリプトを使ってコマンド行からRadiossを起動します。

このスクリプトは、ジョブスケジューラーを介してハイパフォーマンスコンピューティングクラスター上でRadiossを実行する際に使用されるべきです。多くの環境変数が既に定義されているため、セットアップが簡単に済みます。Compute Console (ACC)で使用可能なオプションはすべて、コマンド行から使用できます。

Linuxのコマンド行から実行するには、次のように入力します：

```
<install_dir>/altair/scripts/radioss "filename" -option argument
```

WindowsのDOSプロンプトから実行するには、次のように入力します：

```
<install_dir>\hwsolvers\scripts\radioss.bat "filename" -option argument
```

スクリプトのオプション群は、[使用可能なすべての実行時のオプション](#)で説明されています。

HyperMeshから実行

HyperMeshでRadioss有限要素モデルを作成する際、シミュレーションはRadiossパネルに進むことによりHyperMeshで直接実行できます。

パネルには、Analysisページから、Utilityメニューから、またはApplicationsメニューからアクセスできます。パネルでは、入力ファイル名が求められます。**Solver**ボタンをクリックすると、指定したエクスポートオプションを使ってモデルがエクスポートされ、続いて、マシン上にてローカルに用意されたスクリプトをソルバーが実行します。ソルバー実行の終了後、HyperViewをクリックして、HyperViewで結果を見ることができます。

 **注：** Linuxでは、HyperMeshからRadiossを実行すると、DISPLAYが<ホスト名>:0.0に設定された状態でシェルが起動します。この設定がHyperMeshのDISPLAY設定と異なる場合は、HyperMeshに使用されている21 Altairユニットに加え、25/38 Altairユニットが照合されます。ユニットが追加で照合されないようにするためには、HyperMeshを開始する前に、DISPLAYが<hostname>:0.0に設定されていることを確認します。

実行可能ファイルの直接実行

Radioss実行可能ファイルは直接実行することができますが、各種環境変数が定義される必要があります。

したがって、コンピューターサーバー上でジョブを起動する際は、Altair Simulationに含まれるRadiossスクリプトを使用することが推奨され、容易にできます。それでもなお実行可能ファイルを直接実行する必要がある場合、以下の環境変数を設定しなくてはなりません。

```
RADFLEX_PATH = <install_dir>/hwsolvers/common/bin/<platform>/
RAD_H3D_PATH = <install_dir>/hwsolvers/radioss/lib/<platform>/
HWSOLVERS_TEMPLEX = <install_dir>/hwsolvers/common/bin/<platform>/
ABF_PATH = <install_dir>/hwsolvers/radioss/bin/<platform>/
RAD_CFG_PATH = <install_dir>/hwsolvers/radioss/cfg/
```

スレッド毎のスタックサイズ環境変数も、SMPバージョンの使用時に定義が必要です。

Linux KMP_STACKSIZE=400m

Windows KMP_STACKSIZE=400m

Windowsのみ

```
環境変数を更新、PATH=%PATH%;\<install_dir>\hwsolvers\common\bin\win64;\
<install_dir>\hwsolvers\radioss\lib\win64
```

Linuxのみ。

```
LD_LIBRARY_PATH=<install_dir>/hwsolvers/common/bin/linux64/:<install_dir>/hwsolvers/radioss/lib/linux64
```

スタックサイズメモリは、ログインシェルに応じ、これらのコマンドを用いて無制限に設定しなければなりません。

*csh*シェルを使用

```
limit stacksize unlimited
```

*sh*シェルを使用

```
unlim -s unlimited
```

Radioss実行可能ファイルは、<install_dir>\hwsolvers\radioss\bin\<platform>\にあります。

Radioss StarterおよびEngineを実行するには:

```
./s_<version>_<platform> -i <arguments> <prefix>_0000.rad
./e_<version>_<platform> -i <arguments> <prefix>_0001.rad
```

Radioss MPIソフトウェアでのRadiossの使用については、*Advanced Installation Guide*をご参照ください。

Starter and Engineの終了コード

Starter and Engineには、スクリプトで使用できる終了コードが用意されています。

値は次のとおりです:

0

通常の終了。

2

モデルまたは計算のエラー。

3または128+信号番号

プロセスの障害(コアダンプ、セグメンテーションの障害)

Linuxでは、オペレーティングシステムによってエラーコード136(浮動小数点例外)または139(セグメンテーションの障害)が設定されます。Linuxでは、`\$?`コマンドを使用すると終了コードを取得できます。

```
#!/bin/bash
s_2021.1_linux64 -input [Starter_input]_0000.rad -np 96
Exit_code=$?
echo $Exit_code
```

Windowsでは、スクリプトで`errorlevel`変数を使用します。

```
s_2021.1_win64.exe -input [Starter_input]_0000.rad -np 96
echo %errorlevel%
```

Starterコマンド行引数

Radioss Starterでは次のコマンド行引数がサポートされています。

引数	短縮形式	内容
-help	-h	ヘルプメッセージを表示します

引数	短縮形式	内容
-version	-v	Radiossのリリース情報を表示します
-input [FILE]	-i	Radioss Starter入力ファイルを設定します
-nspmd [INTEGER]	-np	SPMDドメインの数を設定します
-nthread [INTEGER]	-nt	SPMDドメインごとのスレッド数を設定します
-notrap		エラートラップを無効にします
-check		モデルチェックのオプション。領域分割を無効にし、ファイルの書き込みを再開します。
-outfile=[output path]		すべてのファイルの出力ディレクトリを指定します。
-HSTP_WRITE		/PARAMETERモデル情報を含む む<root_name>_0000.rad2hstファイルを出力します。
-HSTP_READ		hst_input.hstpファイルを読み込み、入力デッキの/ PARAMETERを.hstpファイルで指定されたものに置き換えます。
-rxalea [REAL]		[value] xaleaを持つ節点のランダムノイズをアクティブ化します。
-rseed [REAL]		オプション値: 節点のランダムノイズのseed 値を設定します。
-dylib [FILE]		Radiossユーザーサブルーチンのためのダイナミックライブラリの名前を設定します。
-mds_libpath [PATH]		Multiscale Designerのためのダイナミックライブラリのパスを設定します。

-help引数

コマンド行引数のヘルプ情報を表示します。

ヘルプ情報の表示後、Radioss Starterは終了します。

-version引数

Radiossのリリース情報を表示します

出力される情報:

- Radiossタイトル

- radflexの名前
- 使用するバージョン
- ビルド情報(ビルド日時およびビルドタグ)

ヘルプ情報の表示後、Radioss Starterは終了します。

-input [FILE] 引数

Radioss Starter入力ファイルを設定します。

FILE引数には、Radioss Engine入力ファイルを次のフォーマットで指定する必要があります: [ROOTNAME]_[RUN NUMBER].rad

ここで:

ROOTNAMEには、データセットのルート名を指定します。

RUN NUMBERには、4つの数字で表したラン番号を指定します。

```
e.g. CRA2V51_0000.rad  
ROOTNAME: CRA2V51  
RUN NUMBER: 0000
```

注:

- ROOTNAMEおよびRUN NUMBERは入力ファイルから抽出されます。
- -inputコマンドオプションを使用した場合、/BEGINのデータセットROOTNAMEおよびRUN NUMBERの設定は無視されます。
- ファイル名のフォーマットが間違っている場合、ファイルは拒否されます。
- 指定したファイルが開かれず、標準入力を使用されなくなります。
- -inputを設定しなかった場合、Radioss Starterは標準入力を開いて入力を読み出します。

例

```
[user@machine]$ ./s_2021.1_linux64 -input CRA2V51_0000.rad
```

-nspmd [SPMD DOMAIN NUMBER] 引数

SPMDドメインの数を設定します。

ここで:

SPMD DOMAIN NUMBER: INTEGER は、SPMDドメインの数です。

例

```
[user@machine]$ ./s_2021.1_linux64 -nspmd 4
```

注:

- SPMD DOMAIN NUMBERに設定した値が適切でない場合、Radioss Starterはエラーメッセージを表示して停止します。
- `-nspmd`を設定した場合、`/SPMD`入力カードで設定されているドメイン数は無視されます。その他のパラメータの設定がデフォルトのままの場合、`/SPMD`カードは省略しても構いません。
- Radioss Engineでの計算に使用されるプロセスの合計数は、 $\text{SPMD DOMAIN NUMBER} * \text{SMP THREAD NUMBER}$ に等しくなります。

-nthread [SMP THREAD NUMBER] 引数

SPMDドメインごとのSMPスレッド数を設定します。各SPMDドメインは、SMP THREAD NUMBERで構成したマルチスレッドプロセスを使用して計算されます。

ここで、SMP THREAD NUMBER:INTEGER は、SPMDドメインごとのSMPスレッド数です。

例:

```
[user@machine]$ ./s_2021.1_linux64 -nthread 2
```

注:

- SMP THREAD NUMBERに設定した値が適切でない場合、Radioss Starterはエラーメッセージを表示して停止します。
- `-nthread`を設定した場合、`/SPMD`入力カードで設定されているスレッド数は無視されます。その他のパラメータの設定がデフォルトのままの場合、`/SPMD`カードは省略しても構いません。
- Radioss Engineでの計算に使用されるプロセスの合計数は、 $\text{SPMD DOMAIN NUMBER} * \text{SMP THREAD NUMBER}$ に等しくなります。

-notrap 引数

Radioss Starterのエラートラップを無効にします。

デフォルトでは、エラーが発生した場合、Radioss Starterは発生したエラーに対応するエラーメッセージを表示して、適切に停止します。`-notrap`を使用した場合、Radioss Starterは処理を続行し、エラーが発生した時点でコアダンプを実行できます。外部ツールを使用してエラーをトレースする場合、この動作が役に立つことがあります。

標準の動作、エラー処理

1. `-version`
2. `-help`
3. `-nspmd`、`-input`、`-nthread`、`-notrap`

注: 引数 1、2と3は同時に用いることはできません。

`-nspmd`、`-nthread`、`-notrap`、`-input`は同時に使用できます。順序は関係ありません。

次のようなエラーが発生することがあります:

- `-input`、`-nspmd`、または`-nthread`の引数が指定されていない
- `-input`引数がRadiossファイルフォーマットではない
- `-nspmd`または`-nthread`引数が整数ではない
- 未知のコマンド行引数が使用されている

このような場合、`-help`と共にエラーメッセージが表示されます。

-check 引数

モデルチェック後にStarterを停止するためのオプション。

領域分割は計算されず、リスタートファイル(`.rst`)は書き込まれません。これにより、モデルチェックの実行時にStarterモデルの実行時間が短くなります。

-outfile=[output path] 引数

Starterによって、すべての出力ファイルとリスタートファイルが指定の出力パスに書き込まれます。

この出力パスは、絶対パスでも相対パスでもかまいません。出力パスに空白文字がある場合は、パスを引用符で囲む必要があります。Windowsの場合は、ディレクトリの区切り文字として`/`または`\`を使用できます。

例

Linux:

```
s_2022_linux64 -i TENSIS36_0000.rad -outfile=/storage/files/run1
s_2022_linux64 -i TENSIS36_0000.rad -outfile="../my directory"
s_2022_linux64 -i TENSIS36_0000.rad -outfile="/storage/files/my directory"
```

Windows

```
s_2022_win64.exe -i TENSIS36_0000.rad -outfile=c:\storage\files\run1
s_2022_win64.exe -i TENSIS36_0000.rad -outfile="../my directory"
s_2022_win64.exe -i TENSIS36_0000.rad -outfile="c:/storage/files/my directory"
```

-HSTP_WRITE 引数

モデル(`_0000.rad`)内で定義されたすべてのモデルパラメータ(`/PARAMETER`)情報を含む`<root_name>_0000.rad2hst`という名前のファイルを書き込みます。

`schema="altair_pdd"`および`schemaVersion="hstp_v_5"`という設定を持つHyperStudy用の`<root_name>_0000.rad2hst`ファイル。

-HSTP_READ 引数

モデル(`_0000.rad`)内で定義されたパラメータ(`/PARAMETER`)の値を`hst_input.hstp`ファイル内で読み取られた値に置換します。

ファイル`hst_input.hstp`は、`schema="altair_pdd"`および`schemaVersion="hstp_v_5"`という設定を持つHyperStudy用のxmlファイルです。

-rseed [seed] 引数

このオプションでは、節点座標上に値[seed](0~1の実数値)のランダムノイズのシードを定義します。

-rxalea [xalea] 引数

このオプションでは、節点座標上のランダムノイズを値[xalea](正の実数値)で初期化します。

-dylib [FILE] 引数

このオプションでは、実行用のRadiossユーザーサブルーチンRadiossのフルパスまたは相対パス付きのファイル名を追加します。

-mds libpath [PATH] 引数

このオプションでは、Multiscale Designer材料則用のダイナミックライブラリのパスを指定します。デフォルトでは、RadiossはHyperWorks環境で定義されたパスを使用します。

Engineコマンド行引数

バージョン11.0から、Radioss Engine HMPPの実行可能ファイルがMPIに対応し、SPMDとSMPが混在する環境での並列化処理がHybridに完全対応しました。

さらに、簡易化された実行可能ファイルも用意されています。これらはSMPIにしか対応していませんが、MPIは必要ありません。

これら2種類の実行可能ファイルを容易に区別できるよう、MPIの実行可能ファイルには"_mpp"という接尾部が付いていません。

- MPIでコンパイルされたバイナリは、mpirunコマンドを使用して実行する必要があります。一般的な形式は次のとおりです。

```
mpirun [list of mpirun option] engine_executable_mpp [list of engine option]
```

 注: mpirunのオプションリストの内容はMPIのベンダーによって異なります。MPIのドキュメントをご参照ください。

- MPIでコンパイルされたバイナリの場合は、次の形式で実行します。

```
engine_executable [list of engine option]
```

 注: Radioss Engineのオプションリストは、どちらの種類の実行可能ファイルでも同じです。

Radioss Engineでは次のコマンド行引数がサポートされています。各引数にはロングフォームとショートフォームがあり、これらが実行可能ファイルの引数になります。

引数	短縮形式	内容
-help	-h	ヘルプメッセージを表示します

引数	短縮形式	内容
-version	-v	Radiossのリリース情報を表示します
-input [FILE]	-i	Radioss Engine入力ファイルを設定します
-nthread [INTEGER]	-nt	SPMDドメインごとのSMPスレッド数を設定します
-notrap		エラートラップを無効にします
-norst		計算中および計算終了時にリスタートファイル(*.rst)の書き込みを無効します
-outfile=[output path]		すべてのファイルの出力ディレクトリを指定します。
-dylib [FILE]		Radiossユーザーサブルーチンのためのダイナミックライブラリの名前を設定します
-mds_libpath [PATH]		Multiscale Designerのためのダイナミックライブラリのパスを設定します。

-help引数

コマンド行引数のヘルプ情報を表示します。

ヘルプ情報の表示後、Radioss Engineは終了します。

-version引数

Radiossのリリース情報を表示します

含まれる情報:

- Radiossタイトル
- radflexの名前
- 使用するバージョン
- ビルド情報(ビルド日時およびビルドタグ)

ヘルプ情報の表示後、Radioss Engineは終了します。

-input [FILE] 引数

Radioss Engine入力ファイルを設定します。

FILE引数には、Radioss Engine入力ファイルを次のフォーマットで指定する必要があります: [ROOTNAME]_[RUN NUMBER].rad

ここで:

- ROOTNAMEには、データセットのルート名を指定します。
- RUN NUMBERには、4つの数字で表したラン番号を指定します。

注:

- ROOTNAMEおよびRUN NUMBERは入力ファイルから抽出されます。
- -inputコマンドオプションを使用した場合、/RUNのデータセットROOTNAMEおよびRUN NUMBERの設定は無視されます。
- ファイル名のフォーマットが間違っている場合、ファイルは拒否されます。
- 指定したファイルが開かれず、標準入力を使用されなくなります。
- -inputを設定しなかった場合、Radioss Engineは標準入力を開いて入力を読み出します。

例

```
[user@machine]$ mpirun -np 4 ./e_2019_linux64 impi -nt 2 -input CRA2V51_0001.rad
*****
**                                                                 **
**                                                                 **
**              RADIOSS ENGINE 2019                               **
**                                                                 **
**      Non-linear Finite Element Analysis Software                **
**      from Altair Engineering, Inc.                             **
**                                                                 **
**      Linux 64 bits, Intel compiler, Intel MPI                   **
**                                                                 **
**                                                                 **
** Build tag: 0479348_2413000                                     **
*****
** COPYRIGHT (C) 1986-2019 Altair Engineering, Inc.              **
** All Rights Reserved. Copyright notice does not imply publication. **
** Contains trade secrets of Altair Engineering Inc.              **
** Decompilation or disassembly of this software strictly prohibited. **
*****
ROOT: CRA2V51  RESTART: 0001
NUMBER OF HMPP PROCESSES      8
17/10/2008
NC=      0 T= 0.0000E+00 DT= 1.7916E-03 ERR=  0.0% DM/M= 0.0000E+00
  ANIMATION FILE: CRA2V51A001 WRITTEN
NC=     100 T= 1.7826E-01 DT= 1.7700E-03 ERR=  0.0% DM/M= 0.0000E+00
...
NC=    13700 T= 1.9871E+01 DT= 1.4032E-03 ERR= -1.2% DM/M= 0.0000E+00

          ** CPU USER TIME **

#PROC CONT.SORT CONT.F ELEMENT MAT KIN.COND INTEGR. I/O TASK0 ASSEMB RESOL
1 .0000E+00 .0000E+00 .1144E+02 .2910E+01 .7000E-01 .5600E+00 .3100E+00 .5000E+00 .3700E+00 .1364E+02
2 .0000E+00 .0000E+00 .1102E+02 .2870E+01 .7000E-01 .5600E+00 .0000E+00 .0000E+00 .3300E+00 .1364E+02

ELAPSED TIME :      7.79 s

  RESTART FILE: CRA2V51_0001_0000.rst WRITTEN
  NORMAL TERMINATION
  TOTAL NUMBER OF CYCLES:    13793
[user@machine]$
```

-nthread [SMP THREAD NUMBER] 引数

SPMDドメインごとのSMPスレッド数を設定します。各SPMDドメインは、SMP THREAD NUMBERで構成したマルチスレッドプロセスを使用して計算されます。

ここで、SMP THREAD NUMBER: INTEGER は、SPMDドメインごとのSMPスレッド数です。

例

```
[user@machine]$ mpirun -np 4 ./e_2019_linux64 impi -nthread 2 -input CRA2V51_0001.rad
```

注:

- INTEGERに設定した値が適切でない場合、Radioss Starterはエラーメッセージを表示して停止します。
- -nthreadを設定した場合、Starterの現在の実行(/SPMD入力カード、-nthreadコマンド行)またはEngineの以前の実行で定義されたスレッド数は無視されます。
- 環境変数OMP_NUM_THREADSを使用してスレッド数を変更することもできます。この場合、-nthreadの値は、OMP_NUM_THREADSを使用する前の値から変わりません。
- パフォーマンス上の理由から、-ntではなくOMP_NUM_THREADSを使用することをお奨めします。OMP_NUM_THREADSを使用すると、実際の使用スレッド数がシステムに通知されます。
- Radioss Engineでの計算に使用されるプロセスの合計数は、SPMD DOMAIN NUMBER * SMP THREAD NUMBERに等しくなります。

標準の動作、エラー処理

1. -version
2. -help
3. -input, -nthread, -notrap

コマンド行に引数を指定する場合、どのような順序で指定しても構いません。

次のようなエラーが発生することがあります:

- -inputまたは-nthreadの引数が指定されていない
- -input引数がRadiossファイルフォーマットではない
- -nthread引数が整数ではない

このような場合、-helpと共にエラーメッセージが表示されます。

MPIオプションとRadiossオプションの一貫性

-nspmdの値(または/SPMDStarter入力カードのNspmdフィールド)には、mpirun -npと同じ値を指定する必要があります。異なる値を指定した場合、Radioss Engineは該当するエラーメッセージを表示して停止します。

間違ったコマンドの例:

```
[user@machine]$ ./s_2019_linux64 -nspmd 4 -input CRA2V51_0000.rad
```

```
[user@machine]$ mpirun -np 2 ./e_2019_linux64 impi -input CRA2V51_0001.rad
```

この場合、はRadioss標準出力とリストファイルに次のようなエラーメッセージを表示します。

```
THE REQUIRED NUMBER OF MPI PROCESSES DOES NOT MATCH MPIRUN
PLEASE, RUN WITH THE PROPER NUMBER OF MPI PROCESSES
REQUIRED (NSPMD) = 4
AVAILABLE (mpirun -np) = 2
E R R O R T E R M I N A T I O N
TOTAL NUMBER OF CYCLES : 0
```

正しいコマンドの例:

```
[user@machine]$ ./s_2019_linux64 -nspmd 4 -input CRA2V51_0000.rad
[user@machine]$ mpirun -np 4 ./e_2019_linux64 impi -input CRA2V51_0001.rad
```

-notrap引数

このオプションの追加でコアダンプを強制することができます。

これはコールスタックトレースバック情報を得るのに有用です。

-norst引数

計算中および計算終了時にリスタートファイル(*.rst)の書き込みを無効にするためのオプション。

これにより、書き込むファイルの数が減少するため、Engineの実行速度が速くなります。

-outfile=[output path] 引数

Engineによって、すべての出力ファイルとリスタートファイルが指定の出力パスに書き込まれます。

この出力パスは、絶対パスでも相対パスでもかまいません。出力パスに空白文字がある場合は、パスを引用符で囲む必要があります。Windowsの場合は、ディレクトリの区切り文字として"/"または"\ "を使用できます。

例

Linux:

```
e_2022_linux64 -i TENS136_0000.rad -outfile=/storage/files/run1
e_2022_linux64 -i TENS136_0000.rad -outfile="./my directory"
e_2022_linux64 -i TENS136_0000.rad -outfile="/storage/files/my directory"
```

Windows

```
e_2022_win64.exe -i TENS136_0000.rad -outfile=c:\storage\files\run1
e_2022_win64.exe -i TENS136_0000.rad -outfile="./my directory"
e_2022_win64.exe -i TENS136_0000.rad -outfile="c:/storage/files/my directory"
```

-dylib [FILE] 引数

このオプションでは、実行用のRadiossユーザーサブルーチンRadiossのフルパスまたは相対パス付きのファイル名を追加します。

-mds libpath [PATH] 引数

このオプションでは、Multiscale Designer材料則用のダイナミックライブラリのパスを指定します。デフォルトでは、RadiossはHyperWorks環境で定義されたパスを使用します。

解析プロセス

Radiossシミュレーションには、StarterとEngineの2つのパートがあります。Starterは入力データチェックであり、シミュレーションがEngineで完了される前に、エラーなしで正常に完了しなくてはなりません。

StarterとEngine

Radioss Starterは、入力としてのモデル(Starter入力ファイルrunname_0000.rad)と取り込み、Starter出力ファイルrunname_0000.outを生成します。Radioss Starterは、モデルの一貫性をチェックし、出力ファイルにエラーやワーニングをレポートする責任を担います。モデル内にエラーがない場合、Radioss Starterは初期リスタートファイルrunname_0000_CPU#.rstを生成します。解析に要求される各SPMD MPIドメインについて、1つのリスタートファイルが生成されます。

Radioss解析の2番目のパートはRadioss Engineと呼ばれます。Radioss Engineは入力としてRadioss Engineファイルrunname_0001.radおよびRadioss Starterによって生成された初期リスタートファイルを取り込みます。Radioss Engineファイルは、そのシミュレーションについて解析制御と出力を記述します。Radioss Engineが実行している間、時間、時間ステップ、現在のシステムエネルギー、エネルギーエラー、質量エラーなどシミュレーションに関する統計を含んだEngine出力ファイルrunname_0001.outが生成されます。

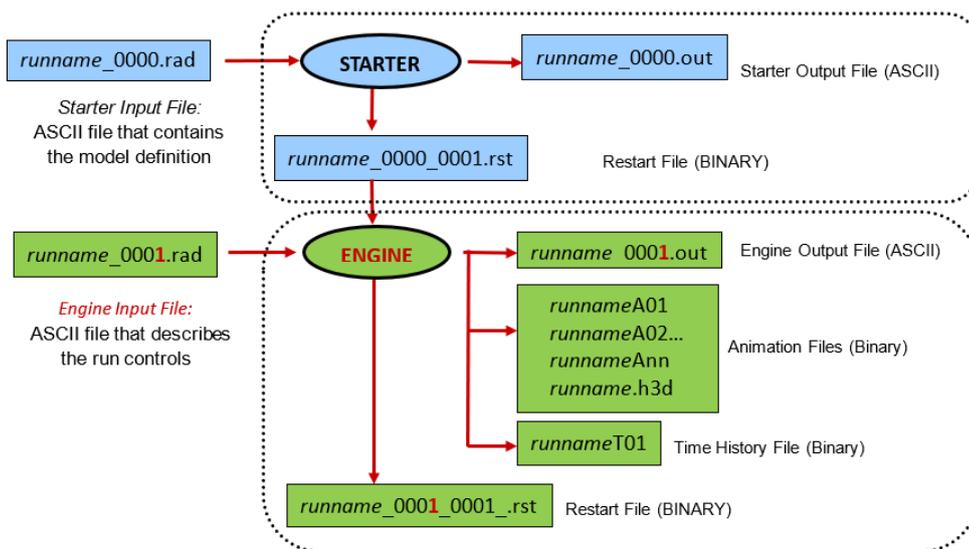


図 2: シングルMPIドメインが使用されている際のRadiossの計算プロセス

メモリおよびディスクの要件

メモリはRadioss Starterによって自動的に割り当てられ、使用される量はStarter出力ファイルにリストされます。

```
STARTER MEMORY USAGE          1486 MB
```

次に、Starterは各MPIプロセスについてのメモリ推量とリスタートファイルサイズを与えます。

```
LOCAL ENGINE STORAGE EVALUATION FOR SPMD PROCESSOR      1
-----
MEMORY USED FOR REALS                80 MB
MEMORY USED FOR INTEGERS             35 MB
TOTAL MEMORY EVALUATION              115 MB
RESTART FILE SIZE                    60091KB
...
LOCAL ENGINE STORAGE EVALUATION FOR SPMD PROCESSOR      18
-----
MEMORY USED FOR REALS                83 MB
MEMORY USED FOR INTEGERS             38 MB
TOTAL MEMORY EVALUATION              122 MB
RESTART FILE SIZE                    63349KB
```

Radioss Engineが実行を終えると、Engine出力ファイルは、シミュレーションによって使用された実際のメモリおよびディスク容量を含むようになります。

```

** MEMORY USAGE STATISTICS **

TOTAL MEMORY USED .....: 10284 MB
MAXIMUM MEMORY PER PROCESSOR.....: 605 MB
MINIMUM MEMORY PER PROCESSOR.....: 562 MB
AVERAGE MEMORY PER PROCESSOR.....: 571 MB

** DISK USAGE STATISTICS **

TOTAL DISK SPACE USED .....: 1421485 KB
ANIMATION/TH/OUTP SIZE .....: 200950 KB
RESTART FILE SIZE .....: 1220535 KB
```

複数コアの使用

近年のCPUは通常、解析時間の短縮に活用できる複数のコアを有しています。

Shared-Memory Parallelism (SMP)、Single Program Multiple Data (SPMD)、Hybrid (SMPとSPMDの組み合わせ)の3つの異なる並列計算法が、問題の解析に用意されています。

SMP法は、指定されたコア(スレッドと呼ばれる)を使ってモデル全体を解析します。

SPMD法は、個々に解析される別個のドメインにモデルを分割し、ドメイン間のコミュニケーションはメッセージ伝達インターフェース(MPI)ソフトウェアによって扱われます。

Hybridモードでは、モデルは別々のドメインに分割され、続いて複数のコア(スレッド)が各ドメインの解析に用いられます。Hybridモードは、SPMD法のみを用いる場合と比べてドメインの数が少ないため、コミュニケーションの量を低減します。これは、1つのコンピュータークラスター上で非常に多くの数のコアを使用する際、あるいは低速のネットワークを介して結合された2つのワークステーションを使用する際に有益です。

各手法で使用するコアの数は、Compute Console (ACC)入力オプションを使って指定されます：

- `-nt NumThreads`(SMPの場合)
- `-np NumDomains`(SPMDの場合)
- `-nt NumThreads -np NumDomains`(Hybridの場合)

推奨されるものは、使用可能なコンピューターのセットアップに応じて異なります。

単一のワークステーション

- 実行オプション`-np NumDomains`を指定することによって、SPMDのみを使用します
- `NumDomains`は、そのワークステーションのCPUで使用可能なコアの数です
- CPUにハイパースレッディングが使用可能な場合、コンピューターはCPUスペックにリストされている2倍の数のコアを有するようになります。これらの追加のコアは仮想のもので、これによるスピードアップは僅かです。これら追加のコアの使用により5%のスピードアップが得られますが、ライセンスの数は要求されるコアの数によるため、追加のライセンスが使用されることとなります。ハイパースレッディングを活用する場合、2 SMPスレッド、`-nt 2`のHybridモードが最良のスピードアップを提供します。たとえば8コアのCPUが使用される場合、`radioss -nt 2 -np 8 model_0000.rad`

コンピュータークラスター

- 使用されるコア数が256未満である場合、最も速い解析時間は`-np NumDomains`を介したSPMDの使用でのみ得ることができます。`-nt=1`がデフォルト値であるため、それを含める必要はありません。
- 使用されるコア数が256より大きい場合、ハイブリッドモードを使用しなければなりません(`-nt NumThreads -np NumDomains`)。 `NumThreads= 2` および `NumDomains= (# cores to be used) / 2`
たとえば、クラスターノードが2 CPUを含み、各CPUは2コアを有する場合。512コアを使用するには、`NumThreads=2`および`NumDomains = 512/2=256`。
- 計算ノード上で使用可能なすべてのコアが使用され、Radiossの解析に充てられる必要があります。すなわち、計算ノードが16コアを有する場合、使用できるコア数は16の倍数でなければなりません。
- ハイパースレッディングコアは、解析内で使用されるべきで、可能な場合、ハイパースレッディングはシステムバイオスで無効にされ得ます。

クラスターの管理を行うために、Altair PBSのようなジョブスケジューラーを使用することが推奨されます。

2個または3個のワークステーション

2個または3個のワークステーションをギガバイトイーサネットと繋いで使用し、1つのシミュレーションで解を求めることができます。

- 最良の結果を得るには、すべてのマシンが同じハードウェアである、もしくは少なくとも同じCPUを擁していなければなりません。
- ハイブリッドモードは、ネットワークコミュニケーション`-np NumDomains -nt NumThreads`を最小限にするために使用できます。NumThreads=2およびNumDomains=(すべてのマシン上で使用可能なコア総数)/NumThreadsを設定することから始めます。ベンチマークモデルを実行し、1個のみのワークステーションでモデルを実行する場合の時間と比較します。
- 次に、NumThreadsを増やしてベンチマークを再度実行し、さらなるスピードアップがあるかどうかを確認します。1 CPU上で、NumThreadsは、コア数以下でなければなりません。NumDomainsは、使用されるコンピューターの数
の倍数でなければなりません。

たとえば、2つのCPUそれぞれで2つのワークステーションを使用し、各CPUのコア数が8の場合、 $2*2*8=32$ コアが使用可能です。

- `-nt 2 -np 16 = OK`
- `-nt 4 -np 8 = OK`
- `-nt 8 -np 4 = OK`

- CPUにハイパースレッディングが可能な場合は、過剰なハイパースレッディングコアを使用してはいけません。

*Altair Simulation Advanced Installation Guide*に詳しく述べられているとおり、追加のセットアップが必要となります。

モデルサイズ

シミュレーションの実行に複数のコアを使用する際は、シミュレーションにリーズナブルな要素数がなければなりません。

スピードアップとスループットの良好なバランスは、解析に使用される各コアに少なくとも10000要素があることを確実にすることで得られます。したがって、320,000要素を有するモデルの場合、 $320,000/10000=32$ コアとなります。通常、コア毎に1000要素までで、さらなるスピードアップが得られます。

異なるコア数の使用

Starterは、SMP並列化を介して複数のコアを使用することができます。

多数のSPMDドメインを用いて実行する極端に大きいモデルの場合、Starterは、SMPコアがドメイン分割に活用されてリスタートファイルを生成していれば、より速く実行します。Compute Console (ACC)または含まれるスクリプトの使用時、StarterおよびEngineは`-onestep`オプションを用いて別々に実行される必要があります。たとえば、CPU毎に12コアを有する1つの計算サーバーの120コアで実行する非常に大きい300万要素のモデルがあるとします。

Starterは12を使って120 SPMDドメインを計算し、リスタートファイルを生成します。

```
radioss -nt 12 -np 120 -onestep model_0000.rad
```

EngineはSPMD並列化を用いて120コアを使用します。

```
radioss -nt 1 -np 120 -onestep model_0001.rad
```

高度なテクニック

シミュレーションの状態のチェック、シミュレーションの停止、一部のシミュレーションオプションの修正または単精度の使用に用いることができる様々な高度なテクニックが存在します。

コントロールファイル(C-ファイル)

オプションのコントロールファイルは、その時点で実行している解析についての情報入手に使用されます。

シミュレーションファイルが実行されている間、Engine出力ファイルに出力されている以上の情報を得ることは非常に有益です。これは、その時点でのEngine入力ファイルと同じ接頭子を持ち*.ctlで終わる名称のRadiossコントロールファイルを用いて行うことができます。その時点で実行されているEngineファイルはTensileTest_0001.radと命名され、コントロールファイルはTensileTest_0001.ctlでなければなりません。

コントロールファイルを使用する理由には以下のものがあります：

- 現在のシミュレーション時間、時間ステップ、サイクル、エネルギー情報および残りの時間の推定量を含むシミュレーションの状態を取得する
- 直ちに、もしくは特定の時間またはサイクル番号で計算を停止する
- 直ちに、もしくは特定の時間またはサイクル番号でアニメーションを生成する

Altair Compute Console でソルバーコントロールオプションにチェックマークが入った状態でシミュレーションが開始されると、次のようなダイアログが現れ、**Send Command**ボタンが選択されている際は、選択されたオプションを使って自動的にコントロールファイルが生成されます。

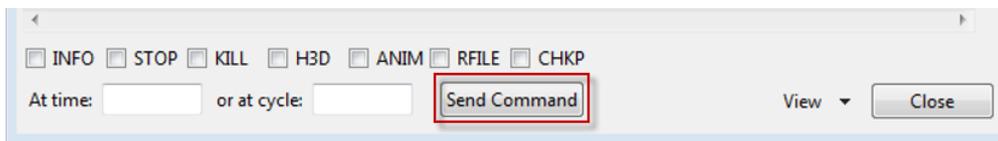


図 3:

Compute Console (ACC)が使用されていない場合、テキストエディタを使ってコントロールファイルが生成され、RadiossがEngine出力ファイルを書き出すディレクトリに保存されます。

以下のオプション群が、それぞれ独自の行に置かれてコントロールファイル内で使用できるよう用意されています。/TIMEまたは/CYCLEが含まれている場合を除き、各動作はRadiossがコントロールファイルを読み出した直後に実行されます。そうではない場合、指定された /TIMEまたは/CYCLEで動作が行われます。

動作	結果
/ANIM	追加のアニメーションファイル(A###)を作成します。Engineファイルで定義された出力頻度は、このオプションが使用されている際は変更されません。
/CHKPT	シミュレーションが停止された場合にそれを継続するための/RERUNコマンドを含んだCHECK_DATAという名のファイルを作成します。通常、シミュレーションを停止するための/STOPと共に使用されます。陰解法解析では使用できません。
/CYCLE/Nbcycle	コントロールファイルコマンドは、指定されたサイクル番号で実行されます。
/H3D	アニメーションデータを*.h3dファイルに書き出します。Engineファイルで定義された出力頻度は、このオプションが使用されている際は変更されません。

動作	結果
/INFO	現在のサイクル、全体エネルギー、時間ステップに関する情報を返します。この情報は常に、すべてのオプションについて書き出されます。
/KILL	シミュレーションを打ち切り、リスタートファイルは生成しません。
/RFILE	リスタートファイルを生成します。
/STOP	シミュレーションを停止し、リスタートできるよう、リスタートファイルを生成します。
/TIME/timeValue	その他のコントロールファイルコマンドは、指定されたシミュレーション時間で実行されます。

Radiossがコントロールファイルを検知すると、入力されたオプションを用いて、シミュレーションのその時点でのステータスが同じコントロールファイル内に書き出されます。

たとえば、シミュレーションはリモートシステム上で稼働していてAltair Compute Consoleを使って開始されなかった場合、TensileTest_0001.radという名のEngine入力ファイル、TensileTest_0001.ct1という名のコントロールファイルが以下の情報を含んで生成され、シミュレーションの作業ディレクトリにアップロードされます。

```
/TIME/.1
/ANIM
/CHKPT
/STOP
```

Radiossがコントロールファイルを検知すると、シミュレーションのその時点でのステータスとコントロールファイルコマンドの実行に関する情報が、同じTensileTest_0001.ct1ファイルに書き出されます。シミュレーション内のt=0.1において、Radiossはアニメーションファイル、CHECK_DATAファイル、リスタートファイルを生成し、シミュレーションを停止します。

```
RUN CONTROL FILE
-----

WRITE NEXT ANIMATION FILES AT TIME  0.1000000

WRITE NEXT RESTART FILE AT TIME  0.1000000

RUN STOP AT TIME  0.1000000

CURRENT STATE:
-----
CYCLE      =      13040
TIME       =  0.8153611E-02
TIME STEP  =  0.6252749E-06SOLID    70
ENERGY ERROR    =  0.0%
INTERNAL ENERGY =  0.1188329E-02
KINETIC ENERGY =  0.1050914E-07
ROT. KIN. ENERGY =  0.000000
EXTERNAL WORK   =  0.1188431E-02
MASS.ERR (M-M0)/M0=  0.000000

CURRENT ELAPSED TIME    =      4.88 s
REMAINING TIME ESTIMATE =     594.04 s
```

複数のEngineファイル

複数のEngineファイルを定義して、シミュレーション中にソリューションコントロールおよび出力を変更することが可能です。

このパワフルな機能の一般的な使用例には以下が含まれます:

1. シミュレーションの前に重力とプリテンションを初期化。

2. アニメーションファイル(/ANIM/DT、/H3D/DT)、時刻歴(/TFILE)、リスタート(/RFILE)といった出力ファイル群の書き出し頻度を変更。
3. 使用される時間ステップコントロールオプション(/DT/Keyword)を変更。
4. システム減衰(/DAMP、/DYRELまたは/KEREL)を修正。
5. 境界条件(/BCS/Keyword)を追加または削除、もしくは初期条件(/INIV/Keyword)を定義。
6. 要素(/DEL/Eltypを削除、または剛体(/RBODY/Keyword2)のオンオフを切り替え。

複数のEngine 入力ファイルの定義と実行

上記のとおり、1つ目のEngineファイルの名称はrunname_0001.radとなります。2つ目のEngineファイルの作成時、数値は最大9999個のEngineファイルまで1ずつ増えます。したがって、2つ目のEngineファイルはrunname_0002.radと命名されます。ワーニングメッセージを回避するには、キーワード/RUNにリストされているRun NumberもEngineファイル番号に一致している必要があります。

例: 1つ目のEngineファイル TensileTest_0001.rad

```
/RUN/TensileTest/1
5.0
/TFILE
0.005
/ANIM/DT
0. 0.5
/ANIM/TENS/STRESS/MEMB
/PRINT/-1000
/DT/NODA/CST
0.9 1e-6
```

例: 2つ目のEngineファイル TensileTest_0002.rad(変更されたオプション付き)。

```
/RUN/TensileTest/2
10.0
/TFILE
0.0005
/ANIM/DT
0. 0.05
/ANIM/TENS/STRESS/MEMB
/PRINT/-10
/DYREL
1.00 0.002
/DT/NODA/CST
0.9 1e-7
```

See Also

[RD-E: 1200 ジャンプする自転車](#)

チェックポイントファイル

チェックポイントファイルは、停止されたシミュレーションを継続するために使用されます。

Engineファイルに変更を加える必要がない場合、停止されたRadiossシミュレーションは、/RERUN/Run Name/Run Numberオプションを含んだチェックポイントファイルCHECK_FILEを用いることで継続できます。CHECK_FILEはテキストエディタの使用により作成でき、Compute Console (ACC)のソルバーコントロールオプションSTOPおよびCHKPTを用いることでシミュレーションを停止できます。

CHECK_FILEファイルは、テキストエディタを使って元のEngineファイルをCHECK_FILEという名称にコピーし、/RUN行を/RERUNに変更し、その他の行をすべてファイルから削除することで作成できます。解析をリスタートするのにAltair Compute Console (ACC)またはRadiossスクリプトを使用する際、StarterまたはEngineファイルは入力ファイルとして選択されることが可能で、先に定義されたものと同じ入力オプション群およびプロセッサの数を使用し、-checkpointオプションを追加します。例えば、

```
radioss -np 4 -checkpoint tensileTest_0000.rad
```

実行可能ファイルで直接Radiossを実行する場合、CHECK_FILEがEngine実行可能ファイルへの入力として使われなくてはなりません。

単精度計算

Radiossの単精度バージョンは、拡張単精度として参照されます。これは、ほとんどの計算が単精度でありながら、一部はより正確な結果を得るために倍精度のままです。

デフォルトで単精度を用いる他の陽解法ソルバーとは異なり、Radiossはデフォルトで倍精度浮動点フォーマットを使用します。倍精度フォーマットは有効精度10進15~17桁を用いる一方、単精度フォーマットは有効精度10進6~9桁を使用します。

モデルに依存しますが、単精度バージョンは倍精度バージョンよりも30% - 40%速く実行します。

計算に単精度が使用される際、単精度では有効桁数が減少するため、浮動点計算で丸め誤差がより多く生じます。陽解法の計算は一度に1サイクルを計算し、その次のサイクルは1つ前のサイクルの計算に基づくため、サイクル数の多いシミュレーションは、シミュレーションが進むにつれて丸め誤差が累積し、結果の精度が落ちる可能性があります。

丸め誤差を最小にするには、倍精度であるRadiossのデフォルトバージョンを使用することが推奨されます。これは、以下の特徴を有するシミュレーションで最も重要です：

- 小さな時間ステップまたは長いシミュレーション時間のためにソリューションサイクル数が多い
- 要素サイズが小さい
- エアバッグシミュレーション
- 陰解法シミュレーション
- 流体および流体-構造相互作用シミュレーション、ALE、CEL
- 弾道シミュレーションなどの高速衝突

シミュレーションが単精度を用いて正確な結果をもたらすかどうかを見極める最も簡単な方法は、単精度結果と倍精度結果を比較して大きな差異がないかを確認することです。単精度結果と倍精度結果は同等にはなりませんが、非常に近いものでなければなりません。

単精度計算の開始

Compute Console (ACC)を使用する際、単精度バージョンは、-spオプションを用いることで起動できます。

```
radioss -np 24 -sp tensile_model_0000.rad
```

Radioss実行可能ファイルを直接使用する場合は、単精度バージョンは、Radioss StarterとEngineの両方について"_sp"名を含んだ実行可能ファイルを使って実行されます。

```
./s_<version>_<platform>_sp -i <prefix>_0000.rad
```

```
./e_<version>_<platform>_sp -i <prefix>_0001.rad
```

See Also

[Run Radioss \(FAQ\)](#)

陽解法構造有限要素解析

ここでは、様々な陽解法解析に利用可能な陽解法機能を紹介します。

時間ステップ

陽解法は、小さな時間増分または時間ステップで結果を計算することによって解かれます。時間ステップのサイズは多くの要因に依存しますが、Radiossによって自動的に計算されます。

結果は各時間ステップ毎、もしくはシミュレーション内のサイクルについて計算されます。したがって、時間ステップが小さいほどシミュレーションが解を得るまでの時間は長くなります。これは、より多くのサイクルと計算が行われるためです。Radioss Theory ManualのDynamic Analysisで説明しているとおり、運動方程式を解くために、直接積分法が使用されます。Radiossで使用される直接積分法は、Newmark時間積分スキームから得られます。この手法は、数値的に安定した時間ステップ Δt を使ってステップ毎の手順で運動方程式を解きます。Numerical Stability of Undamped Systems (Radioss Theory Manual内)は、 $\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{\max}}$ である場合、減衰なしの系が安定していることを示します。ここで、 ω_{\max} は系の最大角振動数です。離散有限要素シミュレーションでは、メッシュを通過する衝撃波が1つの時間ステップ中に1つ以上の要素を通過しない場合、解は安定を保ちます。この方法では、衝撃波はメッシュを通過する際にいかなる節点も失わず、したがって、有限要素メッシュ内のすべての振動数を励起します。材料 c の音速および有限要素の特性要素長 l_c を使うことで、1つの要素長を通過する波動の時間は次のようになります：

$$\Delta t = \frac{l_c}{c} \tag{1}$$

離散解を安定に保つには、時間ステップを、波動が1つの要素を通過するために必要な時間以下にする必要があります：

$$\Delta t \leq \frac{l_c}{c} \tag{2}$$

この安定性の基準は、1928年のCourantによって初めて行われた研究に因んでクーラン条件と呼ばれています。²

要素の時間ステップ

Radiossにより使用されるデフォルトの時間ステップ計算は、要素の時間ステップです。

1つの有限要素について、要素の時間ステップは次のように書かれます：

$$\Delta t_{Element} = \frac{l_c}{c} \tag{3}$$

ここで、

l_c 要素の特性長で、その計算は使用される要素タイプに依存します(ユーザーズガイドの有限要素を参照)。

c 材料の音速で、次のように表されます: $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$

ρ 材料密度

E ヤング率

各シミュレーションサイクルについて、それぞれの要素の特性長と音速は、モデル内の各要素の限界時間ステップを計算するために使用されます。時間ステップの計算は、内力の計算と同時に行われます。シミュレーションのサイクルの時間ステップは、すべての要素の最小時間ステップをスケールファクター（デフォルトは0.9）で掛けることにより、安定性が確保されます。このスケールファクターは、モデルの剛性に突然変化が起こった場合でもシミュレーションが安定性を保つことを確実にするために必要とされます。

要素の時間ステップ手法は、下記を用いてモデル全体に適用されます：

$$\Delta T_{sca} \Delta T_{min} / DT$$

ここで、

ΔT_{sca} タイムステップを小さくする際のスケールファクター

ΔT_{min} 右記にリストされた特定のアクションをアクティブ化する最小時間ステップ； / DT

節点時間ステップ

節点時間ステップは、モデル内の節点質量と節点剛性に基づいて時間ステップを計算します。

節点時間ステップは、各節点の全ての内力が計算された後で次の式で計算されます：

$$\Delta t_{nodal} = \sqrt{\frac{2m}{k}} \quad (4)$$

ここで、

m 節点質量

k 等価な節点剛性

等価な節点剛性は、付加されたそれぞれの要素剛性マトリックスからの固有値の半分を使って計算されます。節点が接触到含まれている場合、接触剛性も等価な節点剛性の計算に含まれます。剛性は、内力計算の間に計算されます。シミュレーションのサイクルの時間ステップは、すべての節点の最小時間ステップをスケールファクター（デフォルトは0.9）で掛けることにより、安定性が確保されます。

品質の高い有限要素メッシュの場合、要素時間ステップおよび節点時間ステップの条件はほぼ同等です。最も典型的な有限要素メッシュには品質の悪い要素が含まれており、そのような場合、計算された節点時間ステップの値は、要素時間ステップの値よりも大きくなります。

節点時間ステップ手法は、下記を用いてモデル全体に適用されます：

$$\Delta T_{sca} \Delta T_{min} / DT / NODA$$

ここで、

ΔT_{sca} タイムステップを小さくする際のスケールファクター

ΔT_{min} 使用されず、0として入力

See Also

[/DT/NODA/Keyword3/Iflag \(Engine\)](#)

全体時間ステップ

全体時間ステップ(GTS: Global Time Step)法は、モデルの固有振動数に基づいてモデルの時間ステップを計算するために使用されます。

一部のモデルでは、全体時間ステップ法は、各要素または節点に基づいた時間ステップの計算と比べてより大きい時間ステップをもたらします。全体時間ステップの計算にはインタラクティブアルゴリズムが使用され、これは、要素または節点時間ステップの計算よりも高価となります。したがって、デフォルトでは、全体時間ステップ計算は20サイクル毎に行われま

/DT/GLOB/Iflag

ΔT_{sca}

Iflag=1の場合、次の行を挿入

Tol_GTSNcycles

ここで、

ΔT_{sca}

タイムステップを小さくする際のスケールファクター

Tol_GTS

インタラクティブアルゴリズムの収束トレランス

Ncycles

全体時間ステップの計算間のサイクル数

全体時間ステップ法は、落下試験のシミュレーションのように剛体に大きな変化がないモデルに役立ちます。

全体時間ステップオプションは、次のフィーチャーに適用できます。

- ソリッド要素: /TETRA4、/TETRA10、次のフラグのヘキサ要素
- /PROP/SOLID: $I_{solid}SOLID = 1$ (Belytschko)、14 (HA8)、17 (H8C)、24 (HEPH) および 16 (20節点)
- シェル要素: $I_{shell}SHELL = 1$ (Belytschko-Tsay)、12 (Batoz) および 24 (HEPH)
- トラス要素
- ビーム要素
- 接触インターフェース: TYPE7、TYPE24 (エッジ-エッジオプションの設定なし)、TYPE2 ($Spot_{flag}FLAG = 25$ および 27)

接触インターフェースの時間ステップ

接触インターフェースの時間ステップは2つの方法で計算されます。1つは剛性に基づき、もう1つはセカンダリ節点の速度に基づきます。

剛性に基づく接触インターフェースの時間ステップ

は、TYPE7、TYPE10、TYPE11、TYPE19、TYPE21、TYPE24、TYPE25のみと計算されます。どちらの時間ステップ手法が使用されようと、接触に含まれる節点は、節点の質量、インターフェース剛性および要素剛性を用いて節点の接触インターフェース時間ステップを計算するために必要とする剛性の増大を擁します。

$$\Delta t_{inter\ nodal} = \sqrt{\frac{2M_{nodal}}{\sum (K_{interface} + K_{element})}} \quad (5)$$

ここで、

M_{nodal}

節点質量

$K_{interface}$ 面剛性

$K_{element}$ 要素剛性

インターフェースTYPE7、TYPE11およびTYPE19の接触運動時間時間ステップは、セカンダリ節点が1つの周期の間にメインセグメントを貫通しないことを確実にするために使用されます。

$$\Delta t_{kin} = \frac{1}{2} \left[\frac{Gap - p}{\frac{dp}{dt}} \right] \tag{6}$$

ここで、

Gap 接触ギャップ

p 貫通量

$\frac{dp}{dt}$ メインセグメント(またはTYPE11接触のライン)に対する貫通しているセカンダリ節点(またはTYPE11接触のライン)の相対速度

モデルからの時間ステップ出力

初期モデルの時間ステップは、Starter出力ファイルに出力されます。実行されるモデルの時間ステップはアニメーションファイルに出力されます。

初期モデルの時間ステップ

モデルの時間ステップを求めるために様々な手法が用意されています。一部のプリプロセッサは、メッシュの時間ステップを計算、表示することができます。Radioss Starterが実行されると、時間ステップが要素タイプと節点に基づいてStarter出力ファイルruname_0000.outに書き出されます。これらの時間ステップ値は上記の式を用いて計算されますが、時間ステップスケールファクターは含みません。

SHELL ELEMENTS TIME STEP		TRIANGULAR SHELL ELEMENTS TIME STEP		NODAL TIME STEP (estimation)	
TIME STEP	ELEMENT NUMBER	TIME STEP	ELEMENT NUMBER	TIME STEP	NODE NUMBER
5.1217130219225E-08	1041	4.9044927553079E-08	9279	3.2906865424675E-07	341
5.1298454158612E-08	1042	4.9751012932874E-08	9295	3.4713722736254E-07	19763
5.1402124677458E-08	1038	4.1091106922772E-07	9652	3.4895519582563E-07	392
7.6281740390682E-07	6518	4.1464052589915E-07	9401	3.5255651364406E-07	393
7.70342828889530E-07	7751	4.1488518301530E-07	9737	3.5725539574746E-07	19764
7.7069143391558E-07	2839	4.3906776879877E-07	9316	3.757579522277E-07	342
7.8642021051951E-07	1606	4.4561567504973E-07	9567	3.854950590958E-07	373
7.9110842135121E-07	4065	4.4736076154325E-07	9484	4.0072422982473E-07	372
7.9440193221468E-07	5299	5.9166324535877E-07	25255	5.9091304769716E-07	324
8.0278552984776E-07	4069	6.0141903476523E-07	9385	6.1747488219924E-07	573
8.2549417437159E-07	3808	6.0173722939190E-07	9636	7.9360621572418E-07	20404
8.3369750227134E-07	523	6.2817012535627E-07	26811	8.0056657120236E-07	6905
8.3475351235039E-07	I 10657	6.6506699638492E-07	26816	8.2646405517907E-07	3340
8.4319561232916E-07	12290	6.8685110404286E-07	26801	8.7228859655617E-07	9415
8.4326249981130E-07	11974	6.8726908423285E-07	26831	8.7461845764403E-07	9374
8.4827514817688E-07	11540	6.9001216040665E-07	26793	8.7487756693950E-07	9473

図 4: Starter出力ファイル内の時間ステップ計算

モデル内の節点時間ステップの分布を示すヒストグラムもまた、Starter出力ファイルに出力されます。

NODAL TIME STEP DISTRIBUTION

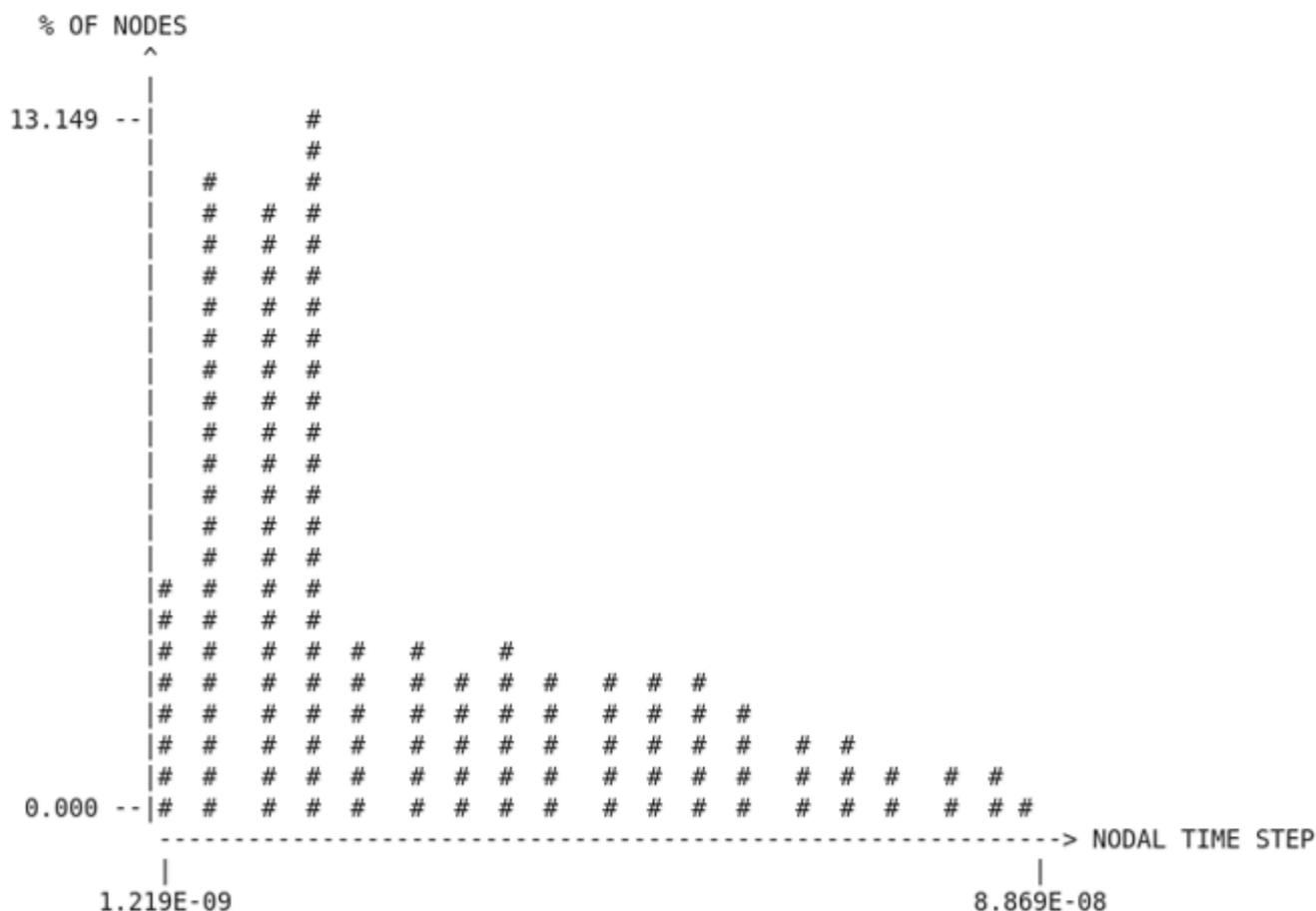


図 5: 節点時間ステップ分布のヒストグラム

実行しているモデルの時間ステップ

Radioss Engineが実行している際、節点時間ステップも、出力オプション/ANIM/NODA/DTまたは/H3D/NODA/DTを使ってアニメーション出力ファイルに書き出すことが可能です。要素時間ステップは、/ANIM/ELEM/DTまたは/H3D/ELEM/DTを用いて入手できます。次にアニメーションファイルはシミュレーション内で要素の時間ステップを観察するために、HyperViewでコンタープロットされます。

時間ステップは、Engine出力ファイルでも確認することができます。頻度は/PRINT/#を使って設定できます。ここでは、時間ステップは#サイクル毎に書き出されるか、もしくはその時点のサイクルの時間ステップ情報をコントロールファイル(C-ファイル)内の/INFOコマンドを使って出力することができます。

要素時間ステップが使用される場合、要素タイプの要素のIDおよび最小時間ステップがEngine出力ファイルに出力されます。モデル内に接触サーフェスがある場合、最小時間ステップとして時間ステップコントロール法で説明されているように節点またはインターフェースがリストされます。

要素によってコントロールされる時間ステップ

CYCLE	TIME	TIME-STEP	ELEMENT	ERROR
0	0.000	0.2043E-03	SHELL	202 0.0%
1000	0.2043	0.2043E-03	SHELL	201 0.0%
2000	0.4086	0.2043E-03	SHELL	201 0.0%
3000	0.6129	0.2043E-03	SHELL	201 0.0%

4000	0.8171	0.2043E-03	SHELL	201	0.0%
------	--------	------------	-------	-----	------

節点時間ステップコントロールが使用される場合、Engine出力ファイルは通常NODEが時間ステップをコントロールしていることを述べ、節点IDをリストします。計算に使用される時間ステップタイプ。では、接触剛性をベースとして時間ステップが下記の式に基づき最小時間ステップであるようなシチュエーションを説明しています。

$$\Delta t_{inter\ nodal} = \sqrt{\frac{2M_{nodal}}{\sum(K_{interface} + K_{element})}} \quad (7)$$

節点によってコントロールされる時間ステップ

CYCLE	TIME	TIME-STEP	ELEMENT		ERROR
0	0.000	0.5317E-06	NODE	20404	0.0%
1000	0.5317E-03	0.5317E-06	NODE	20404	0.0%
2000	0.1063E-02	0.5317E-06	NODE	20404	-0.4%
3000	0.1595E-02	0.5317E-06	NODE	20404	-1.0%
4000	0.2127E-02	0.5317E-06	NODE	20404	-0.9%

接触インターフェースの運動時間ステップはモデル内に最小時間ステップを有し、Engine出力ファイルはINTERが時間ステップをコントロールしていることを述べ、接触インターフェースIDをリストします。これが起こる際、接触インターフェースのセカンダリ節点は非常に速く動くため、1つの時間ステップサイクル内でメイン接触サーフェスを通り、そのため、シミュレーションの時間ステップが小さくなるのが起こるのを阻止します。/DT/INTER/DELを使用した時間ステップ。では詳細が説明されています。

接触インターフェースによってコントロールされる時間ステップ

CYCLE	TIME	TIME-STEP	ELEMENT		ERROR
0	0.000	0.1093E-04	INTER	35	0.0%
1000	0.1093E-4	0.1093E-04	INTER	35	0.0%
2000	0.2186E-4	0.1093E-04	INTER	35	0.0%
3000	0.3279E-4	0.1093E-04	INTER	35	0.0%
4000	0.4372E-4	0.1093E-04	INTER	35	0.0%

時間ステップコントロール法

時間ステップは、時間ステップコントロール法を使って大きくすることが可能です。

陽解法有限要素シミュレーションで最も一般的な問題点の一つに、解を得るためにシミュレーションが要する時間の量があります。モデルの時間ステップが大きいほど、シミュレーションの解を得るのに必要なサイクルは少なくなり、計算時間は短くなります。

接触剛性を無視すると、シミュレーションの最小時間ステップは、メッシュサイズ、材料剛性および密度の関数となります。したがって、モデルの時間ステップを増やす1つ目の方法は、メッシュの平均要素長に対して小さいエッジ長となるよう要素を修正することによりメッシュの品質を向上させる方法です。

メッシュが改善されたら、もう一つの一般的な問題が、メッシュの変形による時間ステップの減少です。先に述べたように、最小時間ステップはシミュレーションの各サイクル中に計算され、変形が起こると要素サイズは小さくなって時間ステップの減少を生じます。時間ステップが大幅に減少すると、シミュレーション時間が大きく増加します。時間ステップの減少の問題に対処するのに様々な手法があります。

多少のバリエーションはあるものの、これらの手法はすべてこの入力フォーマットを使用します。

/DT/option/Keyword3/Iflag

$\Delta T_{sca} \Delta T_{min}$

ここで、

ΔT_{sca}

限界節点時間ステップのスケールファクター

ΔT_{\min} 時間ステップコントロールをアクティブ化するモデルの最小時間ステップ

すべてのオプションで、時間ステップコントロールは、 $\Delta T_{\min} \geq \Delta T_{sca} * \Delta t_{option}$ である際にアクティブ化されます。ここで、 Δt_{option} は、節点、要素またはインターフェースなど、使用されるオプションに基づいた時間ステップ計算です。

シミュレーション中に体積が負になるLagrange要素は、シミュレーションを継続できるよう、自動的にひずみ定式化を切り替えます。これが発生すると、警告のメッセージがEngine出力ファイルに出力されます。

表 1: サポートされるオプション

要素タイプおよび定式化	ひずみ定式化	負の体積の処理方法
/BRICK、 $I_{solid} SOLID = 1、2、14、17、24$	完全に幾何学的非線形 $I_{smstr} SMSTR = 2、4$	負の体積になる前のサイクルの要素形状を使用した微小ひずみに切り替え
/TETRA4、 $I_{tetra} TETRA = 0$ /TETRA10	Lagrange型全ひずみ $I_{smstr} SMSTR = 10、12$	time=0.0における要素形状でのLagrange型全ひずみ

微小ひずみへの自動切り替えは、/NEGVOLでKeyword2をSTOP1に設定することによって無効にできます。

節点時間ステップコントロール

節点時間ステップコントロールは、以下のオプションを用いてシミュレーションにアクティブ化します。

/DT/NODA/Keyword3/Iflag

$\Delta T_{sca} \Delta T_{\min}$

次のように定義されたメッシュ内の節点の時間ステップ:

$$\Delta t_{nodal} = \sqrt{\frac{2m}{k}} \tag{8}$$

ここで、

m 節点質量

k 等価な節点剛性

 注: 節点の質量が増加または剛性が減少すると、シミュレーションの時間ステップは大きくなります。

デフォルトでは、節点時間ステップはモデル全体に適用されます。 $Iflag=1$ である場合、グループ節点セットIDを含んだ追加の行が、スケールファクターと時間ステップの後ろに入力されます。これは、節点時間ステップコントロールを、Starterで定義された節点/GRNODのグループに適用するために使用されます。

 注: どのKeyword3オプションが使用されようとも、Engineファイル内では、/DT/NODA/Keyword3/Iflagオプションは一度に1つだけ使用できます。複数が含まれる場合、一番最後のものが使用されます。

/DT/NODA/CST

/DT/NODA/CSTは、シミュレーション内の時間ステップの保持および増大に群を抜いて人気のあるオプションです。Radiossは自動的に節点に質量を付加し、入力された値を保持します。必要な場合、入力された値に見合うよう、質量はシミュレーションの初めに付加されます。

利点と欠点

/DT/NODA/CSTを介して節点質量を増やすことは、時間ステップを大きくし、シミュレーション中に時間ステップが一定の値を下回ることを回避するための最も簡単な方法です。モデルに追加されるべき適切な量の質量を決定するには、正しい工学的判断が使用されなくてはなりません。追加する質量が多過ぎると、降下や衝撃シミュレーションの運動エネルギーを増大させることにより、物理特性に影響を与えかねません。これは、解析されるオブジェクトが実際のパートよりも重みがあるためです。質量の増加は、弾道や爆発といった超高速な衝突において非常に重要であり得るモデルの高振動数挙動を変化させる場合もあります。

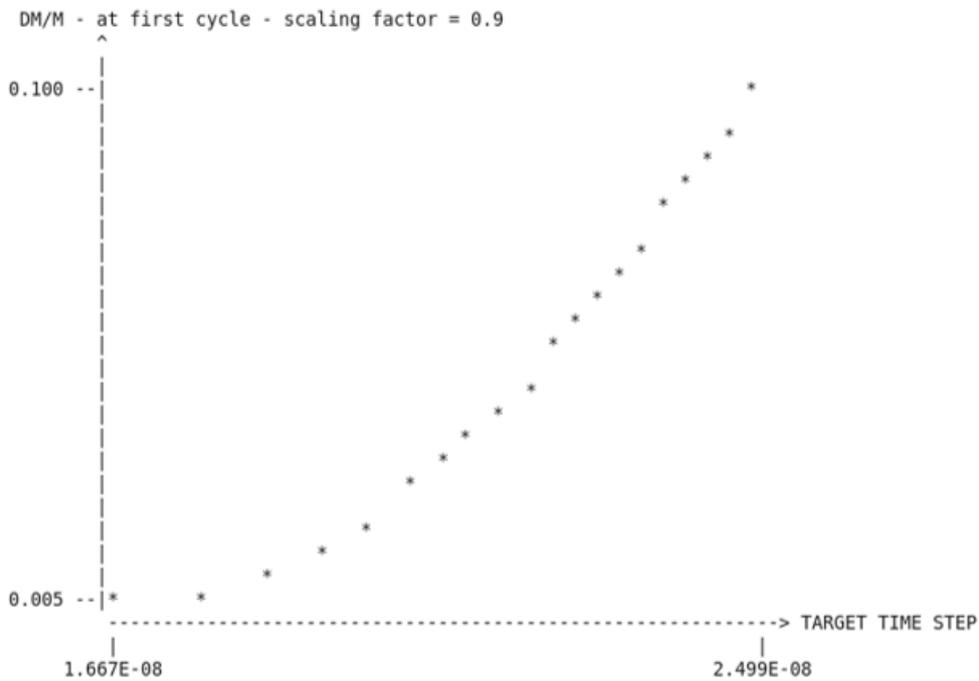
一般的に、追加される質量は5%未満にすることが推奨されますが、特定のシミュレーションではこれ以上でも受容される場合があります。たとえば、準-静的解析では通常速度は小さいため、質量を加えても運動エネルギーが大きく増えることはありません。このような理由により、マススケーリングありとなしでシミュレーションを実行し、それらの結果を比較することによって、モデルでの質量増加をチェックすることが推奨されます。質量の付加が運動エネルギーの増加を招いた場合、Radiossにより計算されるエネルギーエラーは正になります。

マススケーリングのための時間ステップの選択

どれだけの質量がモデルに追加されるかを見定めるために、Radiossは異なる量のパーセント質量増加について目標時間ステップを計算します。ターゲット時間ステップは、0.9および0.67の時間ステップスケールファクター(ΔT_{sca})で、0.5%から10%までのパーセント質量増加について計算されます。この情報は、Starter出力ファイルに一覧およびグラフのかたちで出力されます。

 **注:** この推定は、1つ目のサイクルにおいてのみ有効です。付加された質量は、要素の変形または接触のために実行中に増加する場合があります。これは、付加された質量がStarterの推定で期待された値よりも大きくなり得ることを意味します。

ADDED MASS ESTIMATION for /DT/NODA/CST



DM/M at first cycle	Target time step - scaling factor = 0.9	Target time step - scaling factor = 0.67
1.000E-02	1.795E-08	1.336E-08
2.000E-02	1.960E-08	1.459E-08
3.000E-02	2.062E-08	1.535E-08
4.000E-02	2.144E-08	1.596E-08
5.000E-02	2.217E-08	1.651E-08

WARNING : Theses added mass estimations are valid at first cycle only
Because of element deformation or contacts the added mass can increase during the run

図 6: 異なるターゲット時間ステップに対し付加された質量

ターゲット時間ステップおよびスケールファクターは、/DT/NODA/CSTで使うことができます。

質量増加のチェック

全質量の増加は、Engine出力ファイルのMAS.ERRとタイトル付けされた最後の列にリストされます。アニメーション出力オプション/ANIM/NODA/DMASSまたは/H3D/NODA/DMASSの使用により、節点ごとの相対質量増加がコンタープロットとしてポストプロセッサで可視化できます。全質量エラーおよび節点質量エラーは共に、質量の変化をシミュレーションの最初における元の質量で割ることによって表されます。

$$MASS.ERR \text{ or } DMAS = \left(\frac{DM}{M_0} \right) \tag{9}$$

ここで、 $DM = M - M_0$

ここで、

M_0 各Engineファイルのシミュレーションの初めにおける初期質量

M 現時点の質量

 注: 初期質量は各Engineファイルシミュレーションの初めにリセットされ、全質量の増加はすべてのEngine出力ファイルから付加される必要があります。

全体時刻歴質量およびエネルギー曲線は、増加した質量がシミュレーションに影響を及ぼすかどうかを理解するためにプロットできます。

 注: /TH/PARTを使ったパート質量出力には、マススケーリングのため、付加された質量は含まれません。

/DT/NODA/SET

入力された ΔT_{\min} の値を保つために、相当節点剛性(k)を減らします;この剛性の低減はまた、シミュレーションの物理特性を変化させ、流体のモデリングの際にのみ使用されます。

/DT/NODA/STOP

シミュレーションの時間ステップが入力された ΔT_{\min} の値を下回ると、シミュレーションを停止します。多くの場合、モデルの不安定性により時間ステップは小さくなるため、シミュレーションの停止は問題点の診断に役立ちます。

要素時間ステップコントロール

要素の時間ステップは、以下のEngineオプションを用いてコントロールできます:

/DT/Eltyp/Keyword3/Iflag

$\Delta T_{sca} \Delta T_{\min}$

ここで、

Eltype

要素タイプ

Keyword3

使用される時間ステップコントロールタイプ

Iflag=1の場合、一部の要素タイプおよび時間ステップコントロール手法については、追加の入力を含む2行目が入力されます。

すべてのKeyword3オプションで、行われるアクションは、要素時間ステップの計算が有限要素で定義されている際に起こります。要素時間ステップコントロールの場合、Keyword3オプションはEltyp毎に使用できます。すなわち、同じモデル内で/DT/BRICK/CSTと/DT/BRICK/DELを使うことは不可能ですが、/DT/SHELL/STOPと/DT/BRICK/CSTは一緒に使えます。

/DT/Eltyp/CST

Eltyp=BRICKまたはSHELL.

このオプションは、要素がシミュレーションの時間ステップを ΔT_{\min} より小さくなるようにする場合、要素を微小ひずみ定式化に切り替えることによって時間ステップをコントロールします。これは、その要素についてプロパティ定義/PROPで定義されている I_{smstr} SMSTRの値を使用する際に限って起こります。しかしながら、微小ひずみ定式化への切り替えは、大ひずみほど正確ではなく、精度を下げるのが、リーズナブルな時間でソリューションを得るために必要となります。

/DT/BRICK/CST/1を使用する場合、追加の2番目の行が追加されます。

$\Delta T_{sca} \Delta T_{\min}$

ASP_minVDEF_min

ここで、

ASP_min	最小アスペクト
VDEF_min	最小体積比 (V/Vo)

ASP_minまたはVDEF_minの2つの最小値のいずれかに到達した時点で、要素は微小ひずみ定式化に切り替えられます。ASP_minは、HyperMeshの要素品質チェックと同じテトラ崩壊計算を使用します。ASP_min基準を満たせない要素は、シミュレーションの開始時または実行中に微小ひずみ定式化に切り替えられます。VDEF_minを使用すると、シミュレーションの実行中に、大きく変形または圧縮された要素を微小ひずみ定式化に切り替えることができるので、シミュレーション中に起こり得る負の体積の問題を防止できます。

微小ひずみ定式化への切り替えが起こると、一定のヤコビアンマトリックスが前提となり、すべての空間的変数(特徴長、体積など)はその初期設定にあるとみなされます。この時点では、要素の変形は、時間ステップ計算の際に考慮に入れられません。音速が一定である場合、時間ステップは一定となり、そのまま留まります。一部のソリッド材料則では、音速は圧力依存です。それゆえ、その時間ステップは、 ΔT_{\min} よりも若干小さくなる可能性があります。シミュレーションの最初で要素時間ステップが ΔT_{\min} より小さい場合、要素は微小ひずみ定式化へ切り替わり、要素が最小時間ステップを擁すると仮定され、シミュレーションは ΔT_{\min} より小さい時間ステップで実行されます。要素が微小ひずみ定式化に切り替えられると、Engine出力ファイルにメッセージが出力されます。

利点と欠点

微小ひずみ定式化への切り替えは、時間ステップの減少を止め、継続が許される場合、シミュレーションがより長時間に渡って実行されることとなります。ほとんどの場合、微小ひずみ定式化を使っていくつかの要素によって生じる若干の精度の低下は、結果がリーズナブルな時間で得られることを確実にするためには価値があります。微小ひずみへの切り替えは、動的シミュレーションでの運動エネルギーが大きくなる質量の追加または運動エネルギーがなくなる要素の消去と比べてベターです。時間ステップを保持するための微小ひずみへの切り替えは、質量の追加または要素の消去にかかわる運動エネルギーの追加またはロスよりも良いソリューションでしょう。

シェル要素の場合はソリッド要素よりも制限が少なく、クラッシュの応用例では、メインのシェルの変形は曲げで、膜変形が小さい場合は微小ひずみ定式化は曲げの描写に影響を及ぼしません。

多数の要素の微小ひずみへの切り替えは、検討を要するモデルの問題点を示します。

/DT/Eltyp/DEL

シミュレーションの時間ステップを ΔT_{\min} より小さくする要素を消去します。要素が消去されると、モデルの物理特性が変化します。これは、要素の消去によりモデルの質量、慣性および場合によっては剛性が変わるためです。要素が消去されると、Engine出力ファイルにメッセージが出力されます。

/DT/Eltyp/STOP

シミュレーションの時間ステップが入力された ΔT_{\min} の値を下回ると、シミュレーションを停止します。多くの場合、モデルの不安定性により時間ステップは小さくなるため、シミュレーションの停止は問題点の診断に役立ちます。

接触インターフェースの時間ステップコントロール

接触インターフェースの時間ステップは、以下のEngineオプションを用いてコントロールできます：

/DT/INTER/Keyword3/Iflag

$\Delta T_{sca} \Delta T_{\min}$

すべてのKeyword3オプションについて、行使されるアクションは $\Delta T_{\min} \geq \Delta T_{sca} * \Delta t_{interface}$ である際に起こります。ここで、 $\Delta t_{interface} = \min(\Delta t_{inter\ nodab}, \Delta t_{kin})$ は、**接触インターフェースの時間ステップ**で定義されている接触剛性時間ステッ

プおよび運動学的時間ステップの最小値です。Iflag=1である場合、追加の入力を含んだ2行目が/DT/INTER/AMSに入力されます。

 注: このコントロールは、非線形剛性を含む接触インターフェースTYPE7、TYPE10、TYPE11、TYPE19、TYPE21のみと使用されます。

/DT/INTER/CST

入力された値を保持するために、接触に含まれる節点の質量を自動的に大きくします。通常このオプションはあまり役に立たず、それは、小さい時間ステップの接触セカンダリ節点は、接触ギャップに大きく貫通しており、質量が追加されると運動エネルギーが増大して貫通が増え、モデルが不安定になるためです。追加される質量の量は/DT/NODA/CSTと同様、シミュレーション中に監視され、シミュレーション後にチェックされる必要があります。

/DT/INTER/DEL

シミュレーションの時間ステップを ΔT_{\min} より下に降下させる原因となる接触インターフェースに含まれる節点を消去します。このオプションは特定の時間ステップを保持するのに非常に役立ちますが、消去された節点の数が多過ぎると接触が正しくなくなり、結果が不正確になってしまいます。

/DT/INTER/STOP

接触インターフェースの時間ステップが入力された ΔT_{\min} の値を下回ると、シミュレーションを停止します。多くの場合、モデルの不安定性により時間ステップは小さくなるため、シミュレーションの停止は問題点の診断に役立ちます。

/DT/INTER/AMS

一定の時間ステップ ΔT_{\min} を保持するために、アドバンスドマススケーリングをインターフェースのセカンダリ節点に適用します。詳細については、[高度マススケーリング\(AMS\)](#)をご参照ください。

高度マススケーリング(AMS)

See Also

[/AMS \(Starter\)](#)

[/DT/AMS \(Engine\)](#)

[RD-E:4400 AMSを用いたブロー成型](#)

計算の高速化と精度の維持

AMS(アドバンスドマススケーリング)は陽解法計算においてモデルの時間ステップを増加させることにより顕著に計算時間を節約します。これは付加された質量が系の併進運動エネルギーを増加させないことを除いて伝統的なマススケーリングと同様です。

非対角質量マトリックスが時間ステップの増加のためにその質量マトリックスのそれぞれの行で用いられます。集中質量であるM0が増加されると共にいくつかのMの値が非対角項で全質量が一定を保つように補償されます。¹ 伝統的なマススケーリングと異なり、AMSはモデルの高周波のみを修正し、低周波には大きな影響を与えません。

AMSの伝統的なユーザーコントロールのマススケーリングに対する利点は、併進運動エネルギーを増加させないことです。これより、伝統的なマススケーリングと比べて、結果の品質に重要な影響を与えずに時間ステップを著しく大きくすることを可能にしています。

AMSは全体質量を修正しないため、大きな時間ステップにおいてさえもAMSが作用された節点の全体の運動量は保存されます。大きな時間ステップにおいて、伝統的な/DT/NODA/CSTは計算に大きな量の質量を付加し、併進運動エネルギーを増加させます。

AMSには質量マトリクス計算に伴う計算コストの問題があります。その計算コストはモデル依存ですが、高い非線形性のモデルでは全計算コストの50%になり得ます。従って、サイクル当たりのコストは増加しますが、計算サイクル数は時間ステップの増加により減少します。例えば、伝統的な/DT/NODA/CSTの10倍の時間ステップを用いると、全計算時間は1/3になりました。したがって、経過時間において意味のある減少を見るために、最初は/DT/NODA/CSTの10倍の時間ステップを設定することを推奨します。

計算の収束と精度の良い結果は、目標時間ステップを伝統的なマススケーリングの10から20倍に設定することで得ることができます。製造シミュレーションでは、伝統的なマススケーリングの50倍を用いることが可能です。Courant条件は保持され続けるために、AMSを与えることで目標時間ステップでモデルの安定性が確保される必要があります。

モデルのいくつかの修正が高い時間ステップでの安定性増加に役立つかもしれません。以下はモデルの安定性を保証させるために推奨事項と提案です。

 注: アドバンストマススケーリングは、Radioss特有のものです。計算パフォーマンスと結果の品質の低下無しにモデル全体に作用させることができることからアドバンストと呼ばれます。

バージョン14.0のAMS新機能

- RBE2とRBE3の互換性

バージョン13.0のAMS新機能

- 移動剛壁($node_ID > 0$ の/RWALL)との互換性
- 固定剛壁($node_ID = 0$ またはブランクの/RWALL)を修正
- デフォルト許容値を $1E-4$ から $1E-3$ に変更($ToI_AMS = 0 \Leftrightarrow 0.001$)
- 共役勾配法(C.G.)収束判定条件を改善
- 非対角追加質量マトリクスを最適化

 注: 上記の改善点により発生する計算時間パフォーマンスのわずかな低下を補うためにAMS許容値が変更されていますが、結果の精度には影響しません。

Starter

キーワードのみ

指定されたパートグループ、またはモデル全体にAMSを適用するには、続く行が空白の場合、/AMSのみを指定する必要があります(Radioss Starter 入力)。

 注意: /DT/AMSと続くスケールファクターと目標の増加された時間ステップが、AMSをアクティブ化するため、Radioss Engine入力で必要となります(Radioss Engine入力)。Engineファイルに/DT/AMSが指定されていない場合、Starterファイル内の/AMSは無視されます。

1. Morancay, Lionel, and Gérard Winkelmuller."Dynamic condensation and selective mass scaling in Radioss Explicit."19ème Congrès Français de Mécanique (2009).

HMPP / SPMD

DOMDECが0に設定されている場合、Starterは3(マルチレベルKway分解)をデフォルトで指定します。11.0.230までのリリースでは、/AMSを適用する場合、DOMDECをマニュアルで5(自由度ベースのマルチレベル Kway 分解)に変更する必要があります。11.0.240以降のリリースでは、Starterは、DOMDECが0で/AMSが存在する場合自動的に5を設定し、/AMSがない場合にはDOMDECは3を設定します。

インターフェース

- 接触インターフェースTYPE7、TYPE11、TYPE19では、インターフェース剛性フラグ $I_{stfSTF} = 4$
 $K = \max[St_{min}, \min(St_{max}, K_n)]$ (ここで $K_n = \min(K_m, K_s)$)を用い、剛性スケールファクター $StfacSTFAC$ にはデフォルト値である1を設定することを推奨します。
- 摩擦が含まれる際、このオプションが利用可能な場合(/INTER/TYP7および/TYP19)は、摩擦のペナルティ定式化タイプ $I_{formFORM}$ に 2 (増分剛性のCoulomb 摩擦)を用いることが推奨されます。
- AMSでは、通常のマススケーリングと同様に、TYPE7(摩擦あり)接触が同じパートに既に定義されている場合、TYPE11内の摩擦は持たせないことが推奨されます。これは、時間ステップの落ち込みを避け、モデルの収束を助けるためです。この推奨事項は、TYPE11の摩擦で $I_{formFORM}=2$ (13.0以降にエッジ-エッジ接触で利用可能)が使用されている場合は不要となります。
- 接触に非線形ペナルティ剛性を用いるTYPE7、TYPE11、TYPE19では、/DT/INTER/DELオプションがRadioss Engine入力デッキで必要かもしれません。これがない場合、AMSの収束が遅くなるか、発散する可能性があります。
- /DT/AMSを使用している場合、/DT/INTER/AMSの使用は意味がありませんが、接触が時間ステップに大きく影響する場合は、/DT/INTER/AMSを/DAMP/CSTの代わりに使用できます。
- 初期の交差や貫通は可能な限り除去すべきです(伝統的なマススケーリングでも同様ですが特にAMSの結果において顕著です)。

 **注意:** バリア、他のインパクト、特にダミーにおいては、多くのインターフェースを含んでおり、これらは元の/INTERオプションでの検証に基づいているため修正してはいけません(修正した場合、それらの検証が保障されなくなります)。

剛体

- 小さな剛体の慣性は $I_{spherSPHER}$ を1に設定して球状慣性としたほうがよいでしょう。

 **注意:** ダミーは多くの小さな剛体を含んでいますがそれらは元の/RBODYオプションに基づいて検証されているため修正してはいけません(修正した場合、それらの検証は保障されなくなります)。

- 飛んでいる節点: これには制限はありませんが、不要な結合されていない小さな剛体と共に削除する必要があります。
- Rayleigh減衰: 稀に、シミュレーションの間弾性領域が大きく残っているようなケースでは、AMSパフォーマンスが低下し、コンタープロット(フォンミーゼスなど)で、ノイズの多い時刻暦のカーブ(力-時間など)やひし形模様が生じる場合があります。以下のパラメータを使用して、AMSの対象のパートに影響を与えるRayleigh減衰カード(Starterファイルの/DAMP)を挿入することで、このパフォーマンスは大幅に改善されます:

$$\alpha = 0 \text{ および } \beta = 0.05 \Delta t_{AMS}$$

(ここで、 Δt_{AMS} はAMS目標時間ステップ、したがって β はAMS目標時間ステップの5%)このような変更により、AMS目標時間ステップを大きくすることができ、AMSパフォーマンスの大幅な向上につながります。

 注: ここでRayleigh減衰の代わりに数値減衰(dmまたはNavier-Stokes)を使用することはお勧めしません。

Engine

キーワードのみ: 目標の要素時間ステップと共にAMSを起動させるためには、/DT/AMSのみを指定する必要があります (Radioss Engine 入力)。

 注意: 指定されたパートまたはモデル全体にAMSを作用させるためには、/AMSをRadioss Starte入力に必ず指定してください。

/DT/AMS/IflagでIflagFLAG= 1の場合は、AMS収束の許容値であるToI_AMSを指定する必要があります。IflagFLAGが無視された場合、デフォルト値(1E-3)がToI_AMSに与えられます。必要でない場合は、AMSの収束判定基準の修正は推奨しません。12.0.210では、ToI_AMSは1E-4でした。

/DT/AMS/IflagでIflagFLAG= 2の場合、AMS反復回数を表示することができ、デバッグの手助けや、単に収束の監視を追加のCPUコストなしに行うことができます。発散のメッセージを送るまでの最大許容反復回数はデフォルトで1000です。この値は変更しないことを推奨します。この最大値を上回ると、Radiossは以下のエラーメッセージで停止します:

```
** ERROR ** AMS IS LIKELY DIVERGING
```

- サイクル当たりの反復回数をモニターすることは結果のAMSのパフォーマンスを理解するのに役立ちます。
- 75~100回は収束が非常に悪いことを示しています。50回ではスピードアップは得られない場合があります。30回以下で収束が良いと見なされます。

スケールファクター ΔT_{sca} に関しては、0.9よりも0.67を用いることを推奨します(伝統的なマススケーリング/DT/NODA/CSTでも同様ですが特にAMSの結果との比較において顕著です)。

目標の最小時間ステップである ΔT_{min} は、/DT/NODA/CSTで用いられたものの10から20とします、即ち、10倍から始め、数値的な収束性、経過時間の減少と結果の品質がどの程度かチェックします。

/DT/AMSは全体の質量を修正しないため:

- 関連する節点の全体運動量は保存されます。
- 伝統的なマススケーリングとの比較では、それが参照値として用いられる場合、/DT/NODA/CST計算で小さな付加質量であることが必要です。

/DT/Eltyp/Keyword3は/DT/INTER/CSTを除き、/DT/AMSと適合します(詳しくは、[適合性と制限事項](#)をご参照ください)。

接触インターフェースTYPE7、TYPE11、TYPE19で非線形ペナルティ剛性を用いる場合、/DT/INTER/DELを遅い収束または発散の可能性の場合の回避策として用いてください。

/ANIM/NODA/NDMASを非対角質量変化を出力するために追加できます。

/ANIM/NODA/DINERを節点当たりの追加慣性を出力するために追加できます。

適合性と制限事項

AMSは以下のオプションと適合します:

運動条件

- 境界条件: /BCS
- 強制速度: /IMPVEL
- 強制変位: /IMPDISP
- 強制加速度: /IMPACC
- タイド接触: /INTER/TYPE2 *Spot_{flag}FLAG* 0、1、2(運動条件定式化)、25、27または28(ペナルティ定式化)
 - 剛体: /RBODY(センサーによりアクティブ化または非アクティブ化されない場合)
 - 固定剛壁: /RWALLで*node_ID* = 0または空白(AMSは摩擦のある場合コスト高のため、剛体メッシュのインパクトを用いることを推奨します)
 - 移動剛壁: /RWALLで*node_ID* > 0または空白(AMSは摩擦のある場合コスト高のため、剛体メッシュのインパクトを用いることが推奨されます)
 - 剛体リンク: /RLINK
 - 運動学的ジョイント: /KJOINT (/PROP/TYPE33)および/KJOINT2 (/PROP/TYPE45)
 - 円筒ジョイント: /CYL_JOINT
 - アクティブな断面: /SECT
 - 速度: /VEL/TRAまたは/VEL/ROT
 - 初速度: /INIV/TRAまたは/INIV/ROT
- 剛体: Engineキーワード/RBODY/ONとOFFでアクティブ化および非アクティブ化できます。
- 剛体要素: /RBE2
- 補間拘束要素: /RBE3

要素

- 全ての古典的要素: トラス、ビーム、スプリング、シェルとソリッド
- 4節点テトラ: $I_{tetra4} = 0$ の場合の/TETRA4
- 10節点テトラ: $I_{tetra10} = 0$ の場合の/TETRA10
- 要素定式化
 - QEPH*I_{shell}*SHELL=24と他の全ての*I_{shell}*SHELLオプション
 - HEPH*I_{solid}*SOLID=24

インターフェース

/DT/AMSは以下のインターフェースと適合

- TYPE2(タイド接触を参照)
- TYPE7
- TYPE10
- TYPE11
- TYPE19
- TYPE21
- TYPE24
- TYPE25
- 動的緩和: /DYREL, /ADYREL

- レイリー減衰: /DAMP
- /DT/Eltyp/Keyword3は/DT/AMSと適合します
これは、ある要素で下記の場合に小ひずみ定式化をアクティブ化する/DT/Eltyp/CSTを含みます;

$$\Delta T_{sca} \cdot \frac{l}{c} < \Delta T_{min} \quad (10)$$

ここで、

l 要素の特性長さ

c 材料の音速

- 選択されたパートに適用される/DT/AMS (Starter Inputファイルの/AMS)は、モデルの残りの部分の非AMS指定パートに適用される/DT/NDA/CSTの同時使用を除外するものではありません。これは、AMSが指定されたパートのみ適用される場合も、計算時間を最小化するために推奨されます。

 注: 時間ステップが小さいほど性能が制限されるため、従来のマススケーリングで使用するよりも大きなタイムステップをAMSで使用しても効果はありません。

- 参照マトリクスが無いエアバッグは、機能すべきです。

See Also

[/AMS \(Starter\)](#)

[/DT/AMS \(Engine\)](#)

制限事項 (共存は可能ですがAMSパートグループ外であることが必要)

 注意: ドメイン数が異なる場合、/PARITH/ONはAMSで保証されません。しかしながら、同じドメイン数に対しては、スレッド数がいくつであっても結果は同じです。

- SPH: AMSはSPHの時間ステップを増加させません(例:衝突時のタンクスロッシング)。
- ALE - Euler - FVM: 定式化はサポートされません(時間ステップがより小さい場合、/AMSパート外に置くことはできません)。
- 2D解析: /AMSは使用できません。
- 以下を含むパート:
 - Lagrange乗数: /MPCおよび/GJOINT
 - /FXBODY

このようなケースではRadioss Engineからワーニングが出力され、計算が発散する可能性があります。

- 要素:
 - 4節点テトラ: $I_{tetra4} = 1$ または3を伴う/TETRA4
 - 10節点テトラ: $I_{tetra10} = 2$ を伴う/TETRA10
 - 16節点シェル: /SHEL16
 - 20節点3次元ソリッド: /BRIC20
 - マルチストランド: /XELEM

このような場合、計算は多くの場合発散します。

- 剛体はセンサーでアクティブ化および非アクティブ化することはできません。
- インターフェース: /DT/INTER/CSTは/DT/AMSと適合しません
 - タイドインターフェースTYPE2と接触インターフェース(TYPE7またはTYPE11)の両方のセカンダリである節点では、それらの接触剛性は削除されます。その後、0.outファイル内に次のようなStarterメッセージが発行されます。


```
** WARNING SECONDARY NODE OF AN INTERFACE TYPE2 & AMS
INTERFACE TYPE[7 or 11], ID=xxxxxxx:
SECONDARY NODE ID=yyyyyyy IS ALSO SECONDARY NODE OF AN INTERFACE TYPE2
THE NODE CONTACT STIFFNESS WILL BE DE-ACTIVATED CASE OF /DT/AMS
```

 この接触非アクティブ化は、Spot_{flag}FLAG=25、27または28(TYPE2ペナルティ定式化)を使用することで回避できます。
 - スポット溶接のための運動条件定式化(TYPE2)では、多数のスポット溶接、特にヘキサスポット溶接がある場合は、AMSのパフォーマンスが変化する可能性があります。
- 参照メトリクスのあるエアバッグ: /REFSTAまたは/XREFはAMSスピードアップに寄与しません。
- リファレンスガイドのStarter入力とEngine入力を参照してください。

表 2: 主なアドバンストマススケーリングの制限のまとめ

	AMSの要素時間ステップ Radioss Engine入力の/DT/AMS
Lagrange乗数:	機能しません
16節点厚肉シェルと20節点ソリッド	これらの要素には自由時間ステップが与えられます
センサによる剛体のアクティブ化 / 非アクティブ化	機能しません
インターフェース	TYPE2、TYPE7、TYPE10、TYPE11、TYPE19、TYPE20、TYPE21、およびTYPE25のみがサポートされます。

推奨されるチェックリスト

真に非適合の運動条件(IKC)は注意深くチェックし、存在する場合は解決する必要があります。AMSは失敗するか非常に低い目標時間ステップで実行され、パフォーマンスが低下する可能性があります。一方、同じモデルに対する従来の時間ステップコントロールは正常に実行されます。この意味で、AMSはモデリングの弱点を明らかにします。

AMSを適用するすべてのターゲットモデルは、最初に/DT/NODA/CSTでそのシミュレーション時間で意味のあるエネルギー誤差(ERROR < +2%)と受け入れ可能な付加質量(MAS.ER < 0.02)になるように実行されるべきです。/DT/NODA/CSTで実行できないモデルはAMSでも同じです。

/DT/NODA/CSTを使用した場合、質量が必要以上に付加されると、付加質量の無い結果と比較して結果の違いを引き起こします。必要であれば、/DT/NODA/CSTモデルに戻り、より小さな時間ステップで付加質量の量を減らし、次にAMS結果と比較します。

AMSジョブが失敗または発散する場合、多くはエラーメッセージが出力されます。しかしながら、AMS実行が最後まで行われた場合でも、最大の経過時間節約と共に信頼できる結果の品質のために、多くの項目を注意深くチェックする必要があります。

これらの項目は:

- 時間ステップ変化と目標時間ステップとの比較
 - 時間ステップは、時間ステップの落ち込みなしに目標時間ステップに従うべきです(場合による)。
 - 時間ステップが常に目標のものよりも小さい場合、目標時間ステップは減少させるべきです。
- サイクルでの時間ステップを制御するエンティティ(SOLID、SHELL、SPRING、BEAM、NODE、INTERなど)
- エネルギー誤差変化(負の方向にゆっくりと減少するべき - 増加でない)
- CPUコストを増加させることなく収束の品質をモニタリングするのに、 $/DT/AMS/Iflag - I_{flag}FLAG = 2$ によるサイクル当たりのAMS反復回数の出力を活用することもできます。

発散により停止する前の最大許容反復回数は1000です。サイクル当たり75~100回は収束が悪いことを示しています。50回ではいくらかのスピードアップが得られることがあります。

30回以下で収束が良いと見なされます。

基本的品質インデックス

一定節点時間ステップコントロール(/DT/NODA/CST)で、エネルギーエラー(ERROR %)と付加質量(MASS.ER)が出力ファイル(_0001.out)内で最初にチェックする項目です。

AMSでは付加質量は無効です。エネルギーエラー、時間ステップ変化、サイクル当たりの反復回数の確認が残ります。

両方のアプローチの共通点はエネルギーバランスの曲線です。

結果の精度

AMSの結果への数値的効果は、構造の最大固有周波数の低下と同様です。AMSは高い周波数に影響を与えるため、準静的解析、落下試験と製造(スタンピング)シミュレーションに向いています。爆発や弾道シミュレーションの様にひどく変形した構造または非常に高速の現象に用いるのは推奨しません。細かいメッシュの構造パートのグループに選択的に適用される場合、AMSが衝突シミュレーションで使用されることがあり、モデル全体のパフォーマンスの計算を規制する可能性があります。そのような場合、選択されたこれらのパート(バリア、ダミー、エアバッグ、拘束システムなどの安全サブシステムを除く)のAMS目標時間ステップは、従来のマススケーリングが適用される、残りのモデルの時間ステップ値に設定する必要があります。

多くのケースでは、座屈挙動は(AMSの時の)固有ベクトルの影響を受けません。ボックスビームの様な特別なケースでは、ピーク力の幅と大きさがAMSの大きな時間ステップでは検知できないために変わることがあります。座屈パターンは正しくとも、最初のピークでの吸収エネルギーが等しくなりません。

剛体回転: AMSにより小さな剛体の回転慣性が影響を受けるかもしれません。これらの小さな剛体の慣性が目標の時間ステップを達成するために増加されます。

AMS結果を参照ランと比較した時、参照ランの付加質量が結果に影響を与えない程度に十分に小さいことを確認してください。

まとめ

一定節点時間ステップ(業界で伝統的な/DT/NODA/CST)を“参照”として開始し、AMS 時間ステップ(/DT/AMS)を漸次増加させたものの数値安定性と結果の品質を4段階で示します:

1. 伝統的な一定節点時間ステップ値に近すぎる場合、AMSの数値安定性は素晴らしく、結果も“参照”とほとんど同じです。もちろん、速度増加はAMS反復コストのために望めません。理論的に目標倍率x3は“スピードアップ効率”x1で利点はありせん。
2. 前のケースよりも少し上では、AMS数値的な安定性は満足できる状態のまま、ほとんどは要素最小時間ステップを参照していることを示しています(インターフェースを参照することもあり得ます)。結果はなお“参照”に非常に近

く、AMS反復コストは取り戻され、計算時間の上昇が見られ始めます。1つの推定として、目標倍率x3からx10は、ほとんどの場合でx1.5から x3の範囲の効果的なスピードアップを返し、それ以上も可能です。

3. 上の結果では、数値安定性はサイクル当たりのより多い反復回数でより多くインターフェースの最小時間ステップを参照するようになって、なお満足するようになります。結果は、“参照”と比較してなお受け入れ可能にも見えますし、結構異なるとも見えます。スピードアップは、ペナルティ法に基づいたインターフェースが最小時間ステップが反復回数の増加とスピードアップに影響する時間ステップの落ち込みが引き起こされるまで続きます。しかしながら、目標倍率x10からx20、恐らく x30までは、それぞれ4から6、恐らく9倍の効果的なスピードアップを返すかもしれせん(スタンピング解析ではそれ以上の例も見られます)が、上で定義された“参照”結果と比較してAMS結果がチェックされない限り、それが成功したと考えるべきではありません。
4. 上の前のケースでは、計算が発散してAMSメッセージが表示されて停止、エネルギー誤差の限界(付加質量はなし)で停止、あるいは時間ステップの急激な落ち込みによってユーザーがインタラクティブに停止するかのいずれかです。

1.outファイルの例は、入力された目標時間ステップによるRadioss出力ファイル(1.out)でのAMSの効果を示します。

ヒント

モデルにメッシュサイズが非常に異なるパートが含まれる場合、時間ステップを規制するパートにのみAMSを適用した方が良いでしょう。この場合、計算時間のパフォーマンスを最適化するには、/AMSパートグループに属さないパートには古典的なマスキングを適用することも推奨されます。そうしないと、AMSにより処理されないパートは、デフォルトでは本来の要素時間ステップで計算されます。

例:

```
/DT/AMS/1
ΔT_scaΔT_min
Tol_AMS
/DT/NODA/CST
ΔT_scaΔT_min
```

時間ステップが小さいほど性能が制限されるため、従来のマスキングで使用するよりも大きなタイムステップをAMSで使用しても効果はありません。パートグループが指定されていない(空白行)か0の場合、AMSはモデル全体に適用され、/DT/NODA/CSTを追加しても効果はありません。

AMSでは、通常のマスキングと同様に、TYPE7(摩擦あり)接触が同じパートに既に定義されている場合、TYPE11内の摩擦は持たせないことが推奨されます。これは、時間ステップの落ち込みを避け、モデルの収束を助けるためです。この推奨事項は、TYPE11の摩擦で $I_{form}FORM=2$ (13.0以降にエッジ-エッジ接触で利用可能)が使用されている場合は不要となります。

タイドインターフェースTYPE2と接触インターフェース(TYPE7またはTYPE11)の両方のセカンダリである節点では、それらの接触剛性は削除されます。その後、0.outファイル内に次のようなStarterメッセージが発行されます。

```
** WARNING SECONDARY NODE OF AN INTERFACE TYPE2 & AMS
INTERFACE TYPE[7 or 11], ID=xxxxxxx:
SECONDARY NODE ID=yyyyyyy IS ALSO SECONDARY NODE OF AN INTERFACE TYPE2
THE NODE CONTACT STIFFNESS WILL BE DE-ACTIVATED CASE OF /DT/AMS
```

この接触非アクティブ化は、Spot_{flag}FLAG=25、27または28(TYPE2ペナルティ定式化)を使用することで回避できます。

スポット溶接のための運動条件定式化(TYPE2)では、多数のスポット溶接、特にヘキサスポット溶接がある場合は、AMSのパフォーマンスが変化する可能性があります。

一部の動的なケース(多くの場合弾性状態にある)では、AMS目標時間ステップが強制的に小さくなりAMSのパフォーマンスが低下する、不自然な弾性振動が示されます(アルルカンのようなvon Misesコンターが表示される)。これらの振動は減少させることができ、Rayleigh減衰を適用することで、AMS目標時間ステップが再度増加してパフォーマンスが向上します。減衰の推奨値は、次のとおりです。

$\alpha = 0$ および $\beta = 0.05\Delta t_{AMS}$ は AMS 目標時間ステップ。

 注: バージョン13.0以降は、デフォルト許容値が1E-4から1E-3に変更されました ($Tol_{AMS} = 0 \leftrightarrow 0.001$)。

See Also

/AMS (Starter)

/DT/AMS (Engine)

例: 自動車分野の適用

自動車分野では、目標時間ステップは参照(節点時間一定)時間ステップの10倍に設定されるのが開始として意味のある値です。しかしながら、参照時間ステップの20倍よりも大きい値も成功裏に利用されてきています。

表 3: Table 2: AMSで試されたフルピークルテストのまとめ

荷重 ケース	車両プログラム	Radiossバージョン	コアの数	モデル サイズ	元の節 点時間 ステップ	目標 時間ス テップ	元の 時間ス テップに 対する スピー ドアップ	コメント	ODB オフセットデ フォーダブルバリア FFB フルフロントル バリア (剛体)
前面衝 突	Neonパ ブリック モデル	10.0.2		1M	$1\mu s$	$10\mu s$	4 x		
	Taurusパ ブリック FFBモ デル	11.0.201		0.8 M	$0.5\mu s$	$5\mu s$	2.83 x	剛壁は剛なメッシュと接触インターフェースに交換	
	OEM1 FFB	11と同じ です。	24 x 1	1.3 M	$0.5\mu s$	$5\mu s$	3 x		
	OEM2 ODB	11.0.230	32 x 1	2 M	$0.5\mu s$	$5\mu s$	1.5 x		
	OEM2 ODB	11.0.230	6 x 6	2 M	$0.5\mu s$	$5\mu s$	2 x		
	OEM4 FFB	11.0	32 x 1	1.5 M	$0.5\mu s$	$4\mu s$	1.9 x		
	OEM4 FFB	11.0.230	8 x 6	6 M	$0.5\mu s$	$5\mu s$	1.3 x	剛壁は剛なメッシュと接触インターフェースに交換	
OEM1	11.0_sp	16 x 1	1.1 M	$0.1\mu s$	$2\mu s$	5.8 x			

荷重 ケース	車両プログラム	Radiossバージョン	コアの数	モデル サイズ	元の節 点時間 ステップ	目標 時間ス テップ	元の 時間ス テップに 対する スピー ドアップ	コメント	ODB オフセットデ フォーマブルバリア FFB フルフロントル バリア (剛体)
後面衝 突	OEM1	11.0	16 x 1	1.1 M	0.1 μ s	2 μ s	6.5 x		
側面衝 突	OEM4	11.0	32 x 1	1 M	0.5 μ s	10 μ s	2.1 x	図 10	
ルーフ圧 壊	OEM4	11.0	16 x 1	1.2 M	0.5 μ s	10 μ s	2.9 x	図 11	
	OEM4	11.0	32 x 1	1 M	0.5 μ s	10 μ s	3.4 x		
	Taurusパ ブリック モデル	11.0	16 x 1	0.8 M	0.5 μ s	10 μ s	4.6 x	図 12	

どのスピードアップでも、元の節点時間ステップの倍精度をAMSの単精度と比較しています。

自動車関連結果

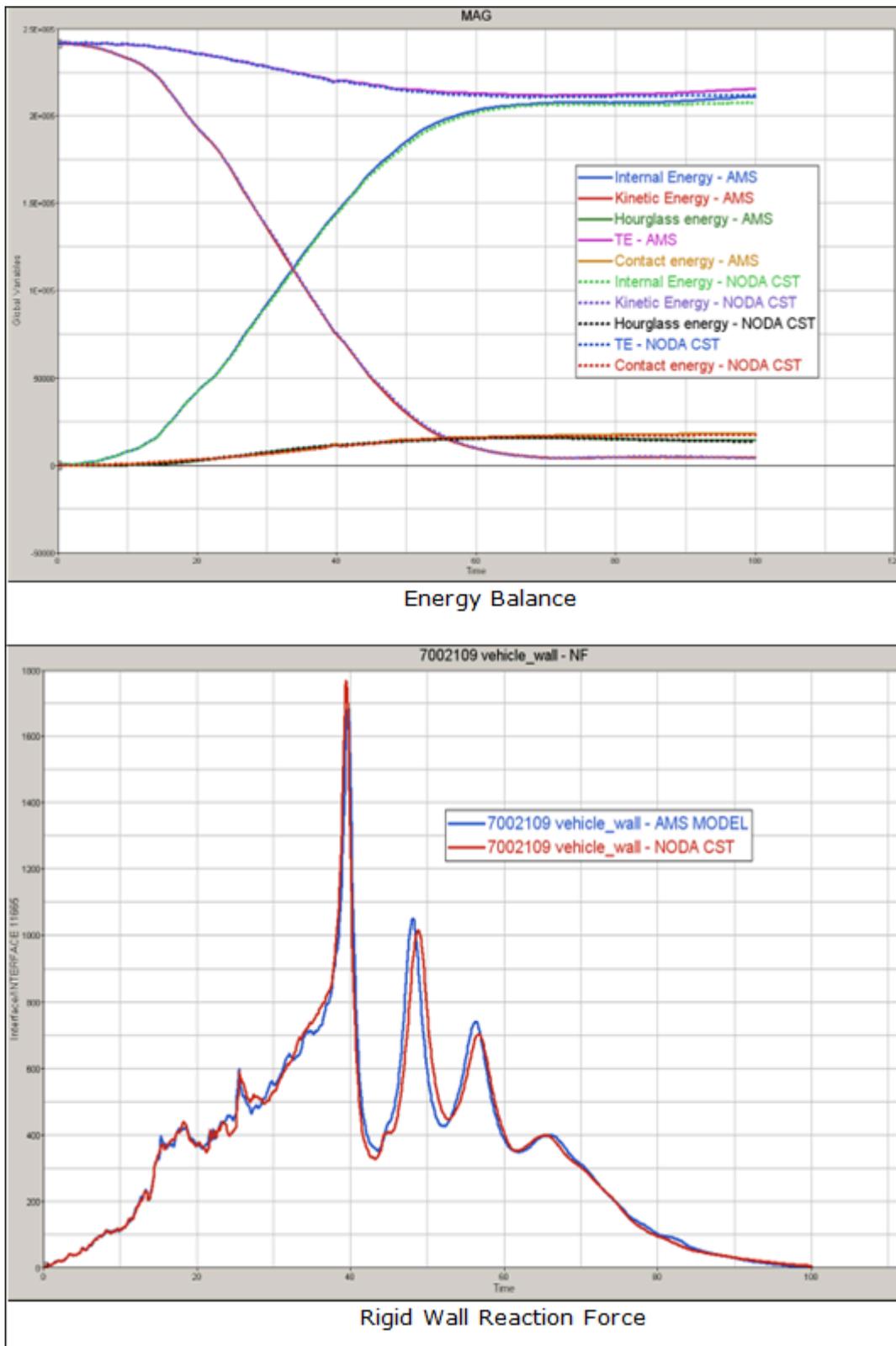


図 7: OEM1 フル前面

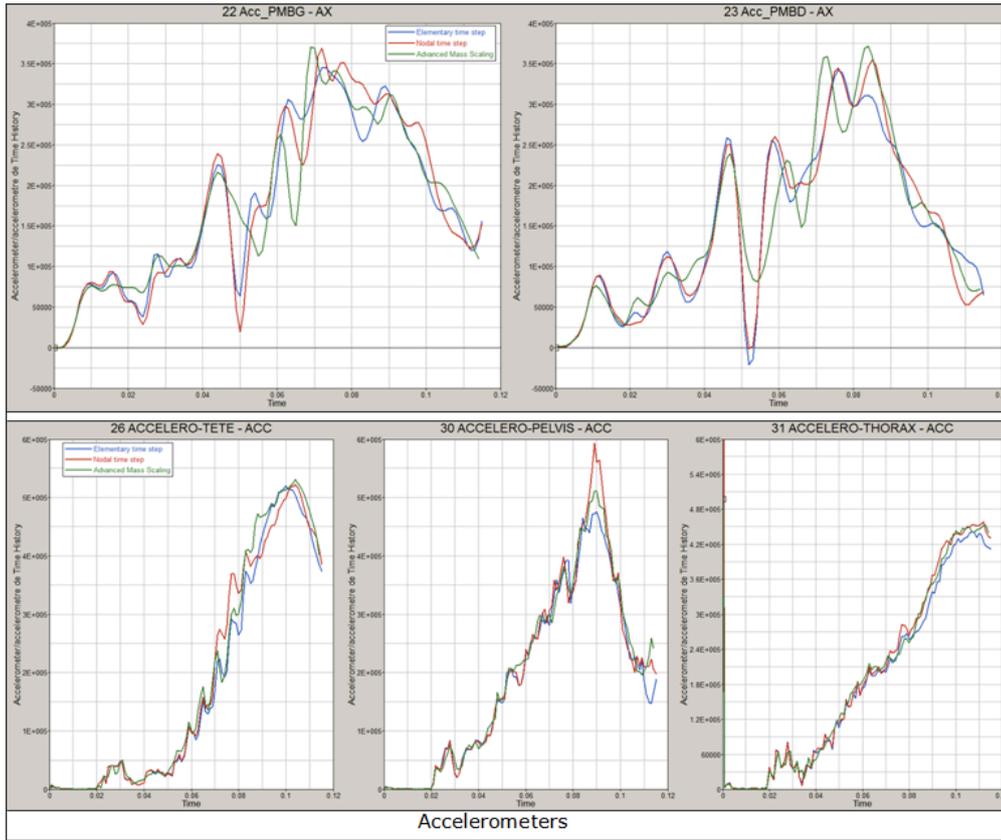
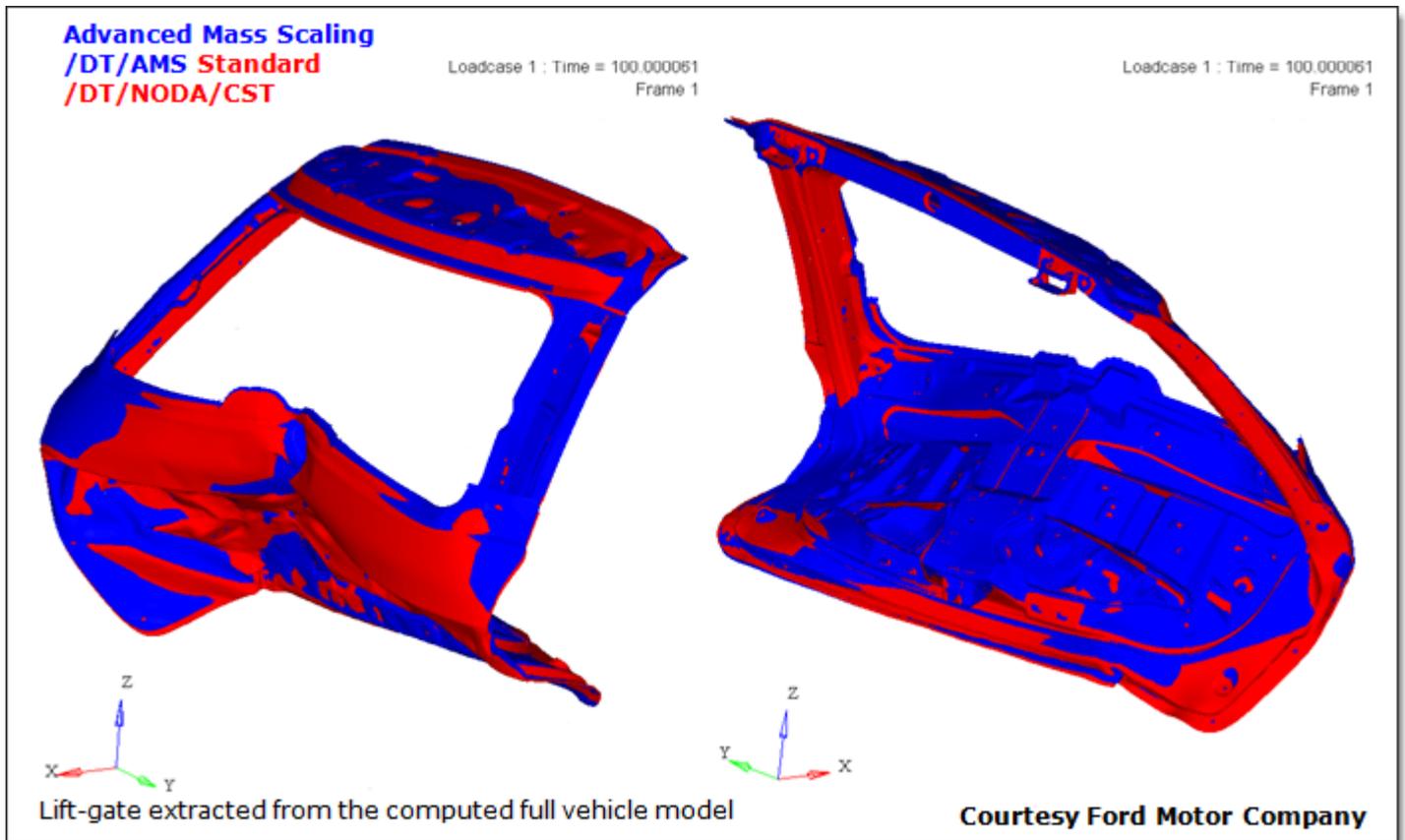


図 8: OEM2 前面オフセット



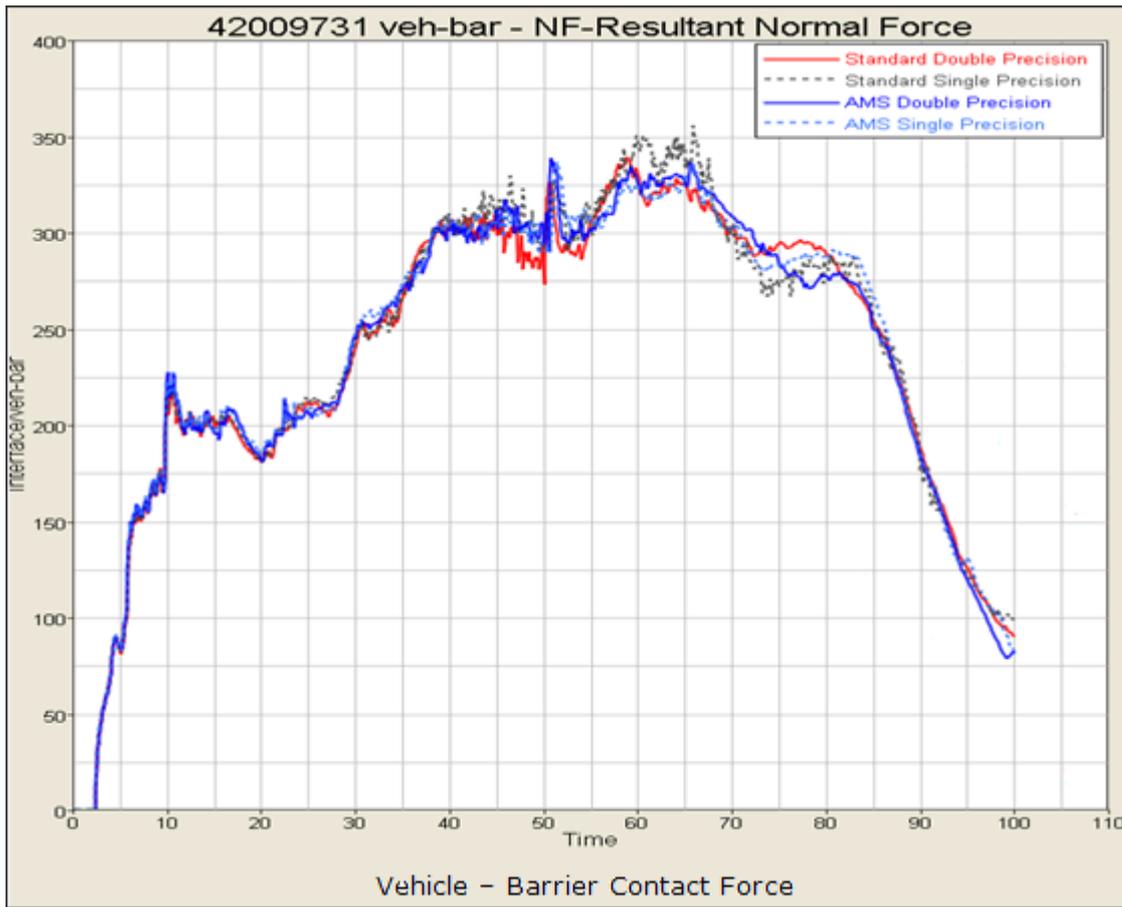


図 9: 前面後面衝突

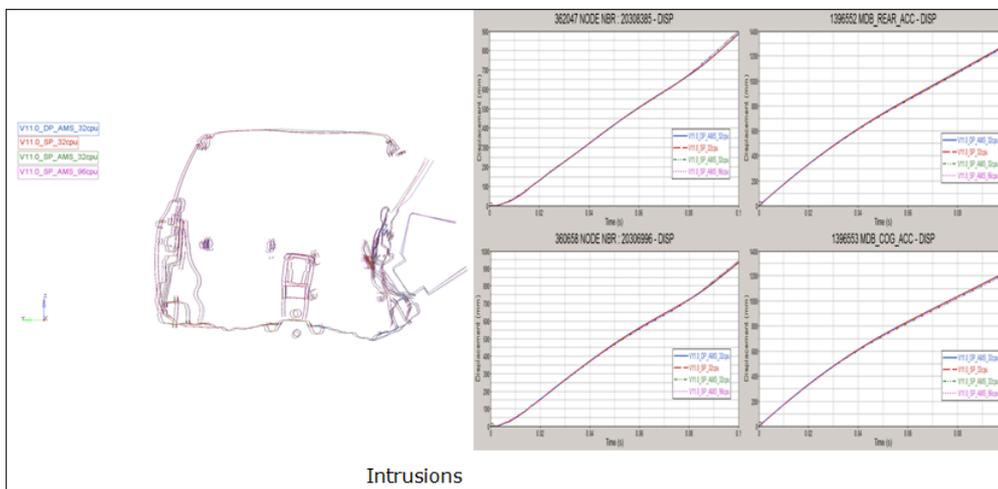


図 10: OEM4 側面衝突

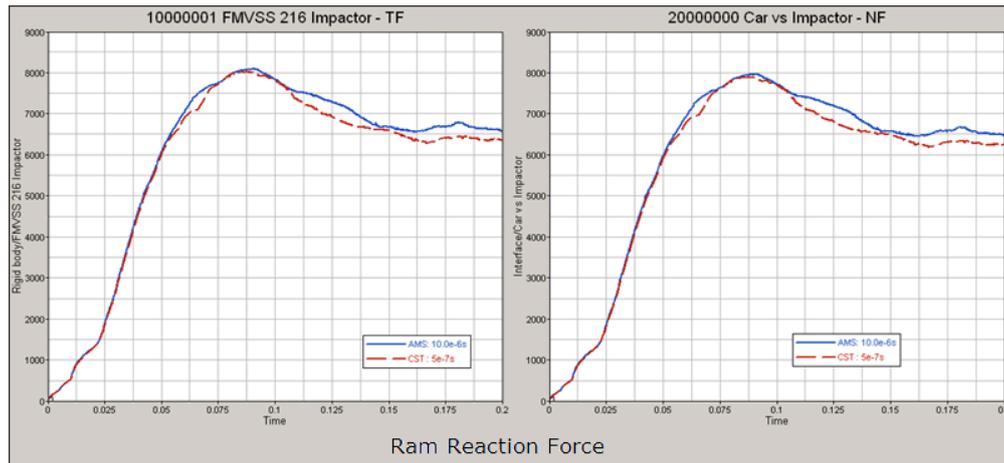
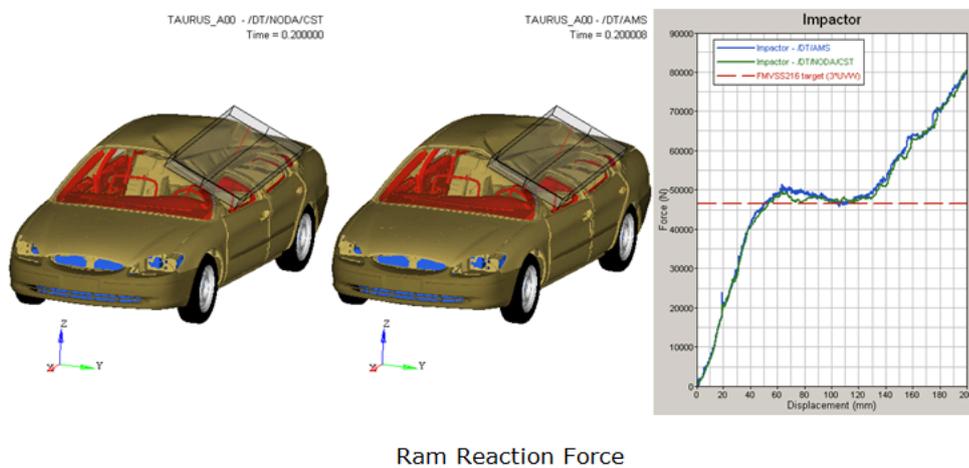
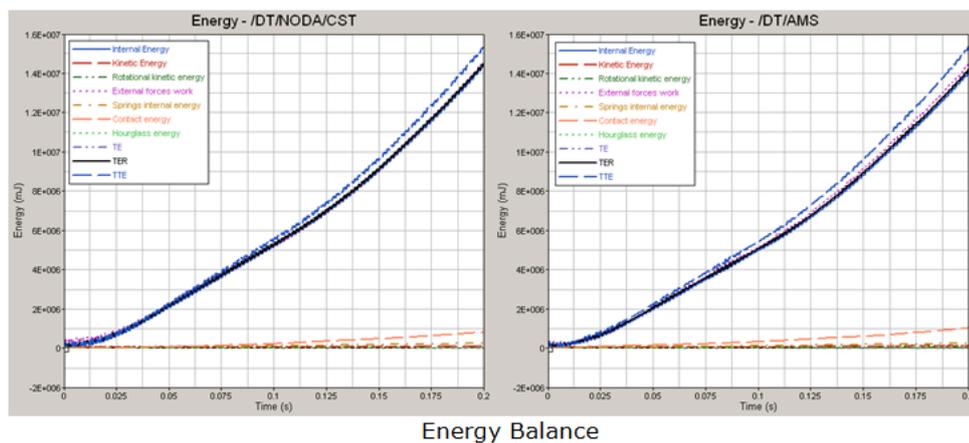


図 11: OEM4 ルーフ圧壊

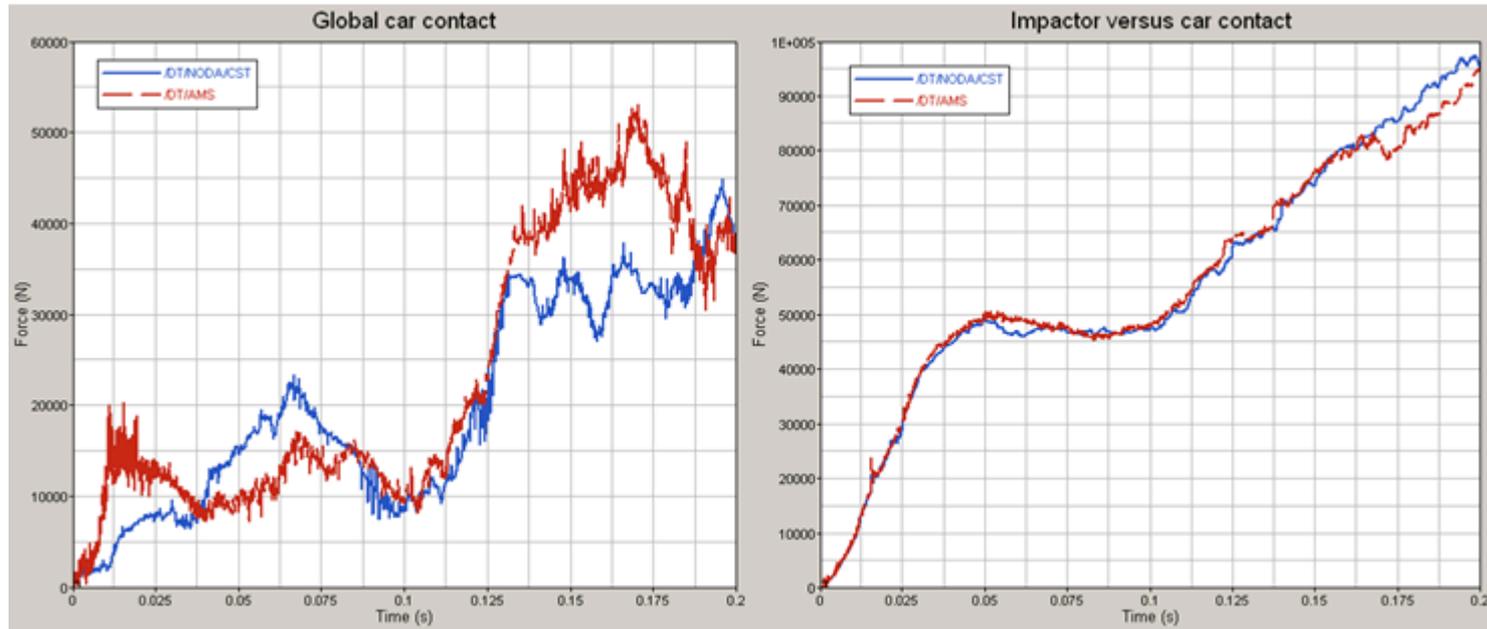


Ram Reaction Force



Energy Balance

図 12: Ford Taurusパブリックモデル ルーフ圧壊



Contact Force Comparison

図 13:

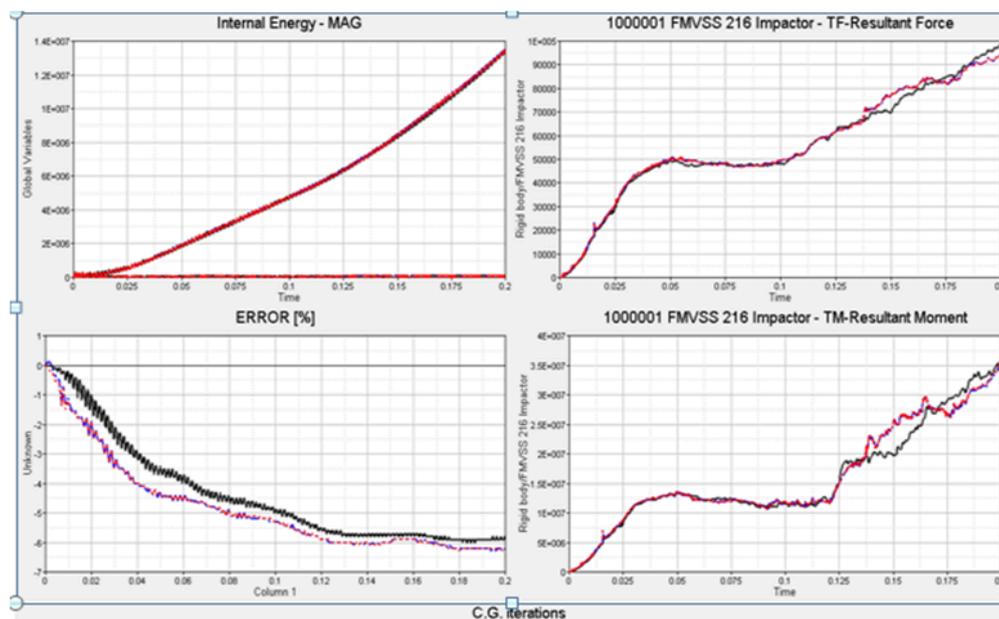
表 4: バージョン13.0のAMSで試されたフルビークルテストのまとめ

荷重 ケース	車両プログラム	Radiossバージョン	コアの数	モデル サイズ	元の節 点時間 ステップ	目標 時間ス テップ	元の 時間ス テップに 対する スピー ドアップ	コメント	ODBオフセットデ フォーマブルバリア FFBフル前面
前面衝 突	Neonパ ブリック モデル	10.0.2		1M	1 ms	10 ms	4		Neonパブリックモデ ル
	Taurusパ ブリック モデル FFB	13.0	3 x 6 x 2	0.8 M	0.5 ms /dt/ inter/ del 0.4 ms	5 ms tol 0.001 /dt/ inter/ del 0.4 ms	1.87	剛壁は剛なメッシュと接触イン ターフェースに交換	
	OEM1 FFB	11と同じ です。	24 x 1	1.3 M	0.5 ms	5 ms	3		
	OEM2 ODB	11.0.230	32 x 1	2 M	0.5 ms	5 ms	1.5		

荷重 ケース	車両プログラム	Radiossバージョン	コアの数	モデル サイズ	元の節 点時間 ステップ	目標 時間ス テップ	元の 時間ス テップに 対する スピー ドアップ	コメント	ODBオフセットデ フォーダブルバリア FFBフル前面
	OEM2 ODB	13.0	3 x 6 x 2	2 M	0.5 ms /dt/ inter/ del 0.1 ms	5 ms tol 0.001 /dt/ inter/ del 0.1 ms	1.51		
	OEM4 FFB	13.0	3 x 6 x 2	1.5 M	0.5 ms /dt/ inter/ del 0.001 ms	4 ms tol 0.001 /dt/ inter/ del 0.001 ms	0.96		
	OEM4 FFB	11.0.230	3 x 6 x 2	6 M	0.5 ms /dt/ inter/ del 0.1 ms	5 ms /dt/ inter/ del 0.1 ms	1.3	剛壁は剛なメッシュと接触インターフェイスに交換	
後面衝 突	OEM1	13.0	3 x 6 x 2	1.1 M	0.1 ms /dt/ inter/ del 0.04 ms /dt/ brick/ cst 2.0 ms	2 ms tol 0.001 /dt/ inter/ del 0.04 ms /dt/ brick/ cst 2.0 ms	4.03		
側面衝 突	OEM4	13.0	3 x 6 x 2	1 M	0.5 ms	10 ms tol 0.001	2.11		

荷重ケース	車両プログラム	Radiossバージョン	コアの数	モデルサイズ	元の節点時間ステップ	目標時間ステップ	元の時間ステップに対するスピードアップ	コメント	ODBオフセットデフォーマブルバリア FFBフル前面
ルーフ圧壊	OEM4メッシュ	13.0	3 x 6 x 2	1.2 M	0.5 ms	10 ms tol 0.001	2.83	剛壁は剛なメッシュと接触インターフェースに交換	
	OEM4メッシュ	13.0	3 x 6 x 2	1 M	0.5 ms	10 ms tol 0.001	1.13	剛壁は剛なメッシュと接触インターフェースに交換	
	Taurusパブリックモデルメッシュ剛体押し出し	13.0	3 x 6 x 2	0.8 M	0.5 ms	10 ms tol 0.001	3.80	剛壁は剛なメッシュと接触インターフェースに交換	
	Taurusパブリックモデル剛壁押し出し	13.0	3 x 6 x 2	0.8 M	0.5 ms	10 ms tol 0.001	2.18	剛壁平行六面体	

どのスピードアップでも、倍精度の元の節点時間ステップを倍精度のAMSと比較しています。灰色の列は、13.0では再実行されなかったモデルに関連し、スピードアップは表 4に属します。



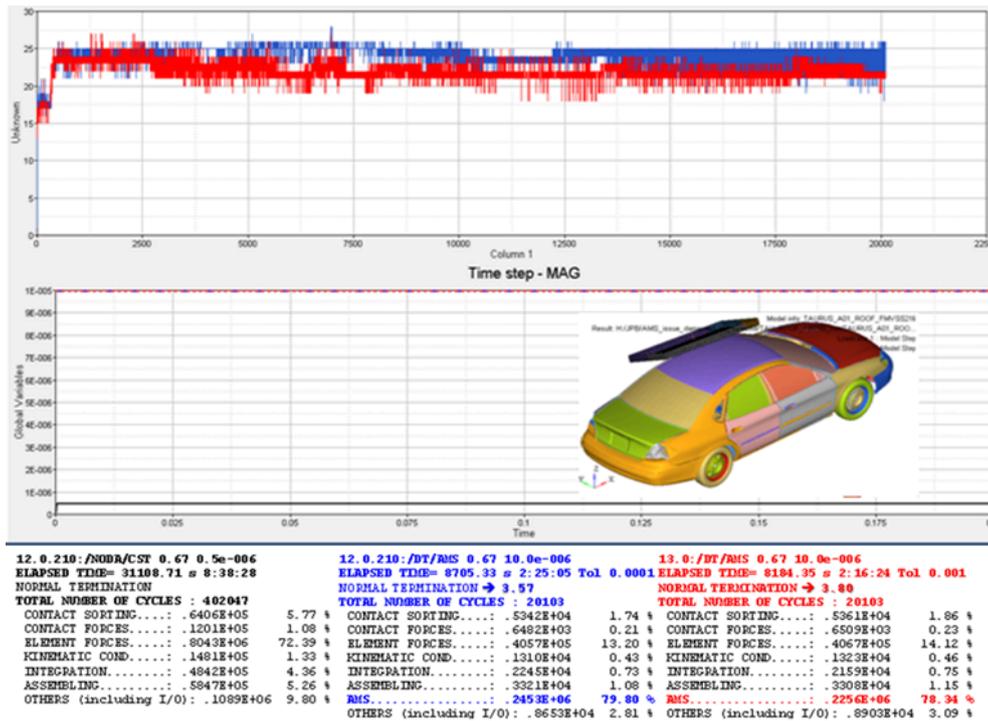


図 14: Ford Taurusパブリックモデル ルーフ圧壊

See Also

[/AMS \(Starter\)](#)

[/DT/AMS \(Engine\)](#)

金属成型適用例

金属成型と準-静的荷重のケースでは、AMSは非常に短時間で解を得、高いレベルの精度を保つことができます(もちろん、正しい時間ステップスケールファクターを用いた場合です)。

ひとつの例として、スタンピングシミュレーションでは、通常、スケールファクター20で正確で参照結果に非常に近い結果が可能です。

他の金属成型シミュレーションに用いられるスピードアップの解法は:

- メッシュのアダプティビティ
- 動的縮退

アダプティブメッシュとの比較では、ほとんどの時間でAMSがより速く、常にアダプティブメッシュオプション(/ADMESH)を用いた場合よりもより正確です。

しかしながら現在、アダプティビティはAMSと適合性があるようになっています。アダプティブメッシュとAMSを同時に用いるためには、動的縮退はスイッチオフする必要があります。

注:

1. AMSは2レベル以上のアダプティブと同時に用いることができます。しかし、アダプティブのレベルによってはスケールファクター20は高すぎるかもしれません。このオプションは注意して使う必要があります。
2. HyperFormを使用する場合、モデル変更の必要はなく、最適化された AMSパラメータが自動的に事前定義されます。

See Also[/AMS \(Starter\)](#)[/DT/AMS \(Engine\)](#)**1.outファイルの例**

以下に、モデルを同じRadioss version 11.0.201で計算し、Engine出力(_0001.out)ファイルの変化を、与えられたAMS時間ステップが過大な場合から過小な場合について示します。

See Also[/AMS \(Starter\)](#)[/DT/AMS \(Engine\)](#)**過剰に予測された/DT/AMS目標時間ステップ****参照時間ステップ/DT/NODA/CSTの20倍**

要素(SOLID)で決まる時間ステップから、インターフェースのスプリング反力剛性によるインターフェース(INTER)時間ステップへの継続的な変更で時間ステップが落ち込み、最後はAMSが発散しています。

CYCLE	TIME	TIME-STEP	ELEMENT	ERROR	I-ENERGY	K-ENERGY T	K-ENERGY R	EXT-WORK	
MAS.ERR									
0	0.000	0.3980E-02	SOLID	1026400	0.0%	0.000	0.4134E+06	0.000	-0.1719E-10
0.7671E-02									
ANIMATION FILE: DFWDS734_AMS_FULL_REWELD_NOSECT_MAXA001 WRITTEN									
10	0.3980E-01	0.3980E-02	SOLID	1026953	0.0%	-4.176	0.4134E+06	0.2174	22.59
0.7671E-02									
20	0.7960E-01	0.3980E-02	SOLID	1027171	0.0%	8.901	0.4135E+06	0.7490	81.41
0.7671E-02									
30	0.1194	0.3980E-02	SOLID	1027865	0.0%	43.57	0.4135E+06	1.742	164.1
0.7671E-02									
40	0.1592	0.3980E-02	SOLID	1026669	0.0%	94.41	0.4136E+06	4.155	261.0
0.7671E-02									
50	0.1990	0.3980E-02	SOLID	1026928	0.0%	158.0	0.4136E+06	9.559	364.5
0.7671E-02									
60	0.2388	0.3980E-02	SOLID	1027135	0.0%	230.8	0.4136E+06	17.50	470.2
0.7671E-02									
70	0.2786	0.3980E-02	SOLID	1027670	0.0%	303.5	0.4137E+06	27.21	574.8
0.7671E-02									
80	0.3184	0.3980E-02	SOLID	1027755	0.0%	366.8	0.4137E+06	36.79	674.5
0.7671E-02									
90	0.3582	0.3980E-02	SOLID	1027323	0.0%	419.8	0.4137E+06	42.80	767.0
0.7671E-02									
100	0.3980	0.3980E-02	SOLID	1026690	0.0%	464.3	0.4137E+06	46.51	850.7
0.7671E-02									
.....									

CYCLE	TIME	TIME-STEP	ELEMENT	ERROR	I-ENERGY	K-ENERGY T	K-ENERGY R	EXT-WORK	
MAS.ERR									
1100	4.378	0.3980E-02	SOLID	1027754	0.0%	2558.	0.4116E+06	61.59	1016.
0.7671E-02									
1110	4.418	0.3980E-02	SOLID	1027894	0.0%	2617.	0.4116E+06	63.80	1002.
0.7671E-02									

1120	4.457	0.3980E-02	SOLID	1026231	0.0%	2680.	0.4115E+06	63.67	990.5
0.7671E-02									
-- CONSTANT TIME STEP FOR SOLID ELEMENT NUMBER 7004937									
1130	4.497	0.3980E-02	SOLID	1027738	0.0%	2744.	0.4114E+06	61.73	980.9
0.7671E-02									
1140	4.537	0.3980E-02	SOLID	1027858	-0.1%	2807.	0.4113E+06	59.50	973.5
0.7671E-02									
-- CONSTANT TIME STEP FOR SOLID ELEMENT NUMBER 7004935									
1150	4.577	0.3980E-02	SOLID	1027880	-0.1%	2867.	0.4113E+06	58.56	968.7
0.7671E-02									
1160	4.617	0.3980E-02	SOLID	1027278	-0.1%	2926.	0.4112E+06	59.27	966.8
0.7671E-02									
-- CONSTANT TIME STEP FOR SOLID ELEMENT NUMBER 7004933									
1170	4.656	0.3980E-02	SOLID	1027327	-0.1%	2984.	0.4111E+06	62.11	968.2
0.7671E-02									
-- CONSTANT TIME STEP FOR SOLID ELEMENT NUMBER 7004931									
1180	4.696	0.3916E-02	INTER	42009748	-0.1%	3047.	0.4111E+06	66.28	973.2
0.7671E-02									
1190	4.735	0.3779E-02	INTER	42009748	-0.1%	3111.	0.4110E+06	72.50	982.0
0.7671E-02									
1200	4.772	0.3709E-02	INTER	42009748	-0.1%	3178.	0.4109E+06	80.35	994.9
0.7671E-02									
-- CONSTANT TIME STEP FOR SOLID ELEMENT NUMBER 7004929									
1210	4.809	0.3628E-02	INTER	42009748	-0.1%	3247.	0.4109E+06	89.95	1012.
0.7671E-02									
1220	4.845	0.3591E-02	INTER	42009748	-0.1%	3319.	0.4108E+06	98.18	1033.
0.7671E-02									
1230	4.881	0.3659E-02	INTER	42009748	-0.1%	3394.	0.4107E+06	104.3	1060.
0.7671E-02									
-- CONSTANT TIME STEP FOR SOLID ELEMENT NUMBER 7004927									
1240	4.917	0.3621E-02	INTER	42009748	-0.1%	3474.	0.4107E+06	108.6	1090.
0.7671E-02									
1250	4.954	0.3656E-02	INTER	42009748	-0.1%	3561.	0.4106E+06	113.7	1124.
0.7671E-02									
1260	4.990	0.3622E-02	INTER	42009748	-0.1%	3656.	0.4105E+06	117.2	1159.
0.7671E-02									
ANIMATION FILE: DFWDS734_AMS_FULL_REWELD_NOSECT_MAXA002 WRITTEN									
1270	5.026	0.3631E-02	INTER	42009748	-0.1%	3760.	0.4105E+06	122.4	1194.
0.7671E-02									
1280	5.062	0.3585E-02	INTER	42009748	-0.1%	3865.	0.4104E+06	122.7	1226.
0.7671E-02									
1290	5.098	0.3567E-02	INTER	42009748	-0.1%	3972.	0.4103E+06	125.0	1255.
0.7671E-02									
1300	5.133	0.3578E-02	INTER	42009748	-0.1%	4074.	0.4102E+06	126.3	1280.
0.7671E-02									
.....									
39500	79.47	0.6686E-03	INTER	42009748	-9.4%	0.2141E+06	0.1554E+06	1465.	-4253.
0.7671E-02									
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 873536									
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 873327									
39510	79.48	0.6686E-03	INTER	42009748	-9.4%	0.2141E+06	0.1554E+06	1465.	-4254.
0.7671E-02									
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 873995									
39520	79.48	0.6685E-03	INTER	42009748	-9.4%	0.2141E+06	0.1554E+06	1466.	-4255.
0.7671E-02									
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 872733									
39530	79.49	0.6684E-03	INTER	42009748	-9.4%	0.2141E+06	0.1554E+06	1466.	-4256.
0.7671E-02									
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 876109									
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 876112									
39540	79.50	0.6684E-03	INTER	42009748	-9.4%	0.2141E+06	0.1554E+06	1467.	-4257.
0.7671E-02									
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 874081									
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 874082									
** ERROR : AMS IS LIKELY DIVERGING:									
TOTAL C.G. ITERATION NUMBER = 1000 AT CYCLE NUMBER 39550									
39550	79.50	0.6685E-03	INTER	42009748	NaN%	0.2141E+06	NaN	NaN	-4258.
0.7671E-02									
** CPU USER TIME **									

ケース: AMSmaxi_x20_div 79.5stop_32cpu_14.5h_110201 sep30

ほぼ受け入れ可能な/DT/AMS目標時間ステップ

参照時間ステップ/DT/NODA/CSTの13倍

要素 (SH3NとSOLID) で決まる時間ステップから、インターフェースのスプリング反力剛性によるインターフェース (INTER) 時間ステップへと、初期に時間ステップをコントロールしていた要素の移動による節点 (NODE) 時間ステップへの変更が遅くなってから起こっていることに注意してください。

(AMSの発散はなく、ジョブは37220回目のサイクルで 100msが成功裏に終了しています)

CYCLE	TIME	TIME-STEP	ELEMENT	ERROR	I-ENERGY	K-ENERGY T	K-ENERGY R	EXT-WORK
MAS.ERR								
0	0.000	0.2736E-02	SOLID 1026805	0.0%	0.000	0.4134E+06	0.000	.1719E-10
0.7671E-02								
ANIMATION FILE: DFWDS734 AMS_FULL_REWELD_NOSECT_OPT1A001 WRITTEN								
10	0.2736E-01	0.2736E-02	SOLID 1026339	0.0%	-9.938	0.4134E+06	0.9492E-01	11.27
0.7671E-02								
20	0.5472E-01	0.2736E-02	SH_3N 980467	0.05%	-2.140	0.4135E+06	0.2769	
41.40	0.7671E-02							
30	0.8209E-01	0.2736E-02	SH_3N 983904	0.0%	12.94	0.4135E+06	0.7553	86.61
0.7671E-02								
40	0.1094	0.2736E-02	SOLID 1025858	0.0%	34.57	0.4135E+06	1.560	142.9
0.7671E-02								
50	0.1368	0.2736E-02	SOLID 1026994	0.0%	65.14	0.4136E+06	2.777	207.0
0.7671E-02								
60	0.1642	0.2736E-02	SH_3N 979591	0.0%	102.8	0.4136E+06	4.844	276.2
0.7671E-02								
70	0.1915	0.2736E-02	SH_3N 1011870	0.0%	147.1	0.4136E+06	8.051	348.0
0.7671E-02								
80	0.2189	0.2736E-02	SOLID 1027827	0.0%	197.0	0.4136E+06	12.51	421.2
0.7671E-02								
90	0.2463	0.2736E-02	SOLID 1025763	0.0%	249.5	0.4136E+06	17.97	494.7
0.7671E-02								
100	0.2736	0.2736E-02	SOLID 1026760	0.0%	300.5	0.4137E+06	24.45	567.3
0.7671E-02								
.....								
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 9861056								
CYCLE	TIME	TIME-STEP	ELEMENT	ERROR	I-ENERGY	K-ENERGY T	K-ENERGY R	EXT-
WORK	MAS.ERR							
5500	15.04	0.2736E-02	SH_3N 980451	-1.0%	0.3598E+05	0.3741E+06	377.9	1060.
0.7671E-02								
5510	15.06	0.2736E-02	SH_3N 980451	-1.0%	0.3607E+05	0.3740E+06	379.4	1048.
0.7671E-02								
5520	15.09	0.2736E-02	SH_3N 980440	-1.0%	0.3614E+05	0.3739E+06	380.1	1035.
0.7671E-02								
5530	15.12	0.2736E-02	SH_3N 983880	-1.0%	0.3623E+05	0.3738E+06	379.8	1021.
0.7671E-02								
5540	15.15	0.2736E-02	SH_3N 1012368	-1.0%	0.3630E+05	0.3737E+06	379.0	1005.
0.7671E-02								
5550	15.17	0.2736E-02	SH_3N 980451	-1.0%	0.3638E+05	0.3736E+06	377.9	987.8
0.7671E-02								
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 9897179								
5560	15.20	0.2736E-02	SH_3N 980112	-1.0%	0.3645E+05	0.3735E+06	377.0	969.7
0.7671E-02								
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 9896885								
5570	15.23	0.2736E-02	SH_3N 1015803	-1.0%	0.3652E+05	0.3734E+06	376.7	950.6
0.7671E-02								
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 9897148								
5580	15.26	0.2736E-02	SH_3N 1012363	-1.0%	0.3659E+05	0.3733E+06	377.0	930.5
0.7671E-02								
5590	15.28	0.2736E-02	SH_3N 1018445	-1.0%	0.3666E+05	0.3732E+06	377.9	909.5
0.7671E-02								
5600	15.31	0.2736E-02	SH_3N 971703	-1.0%	0.3673E+05	0.3731E+06	378.8	887.8
0.7671E-02								
.....								
18200	48.77	0.2393E-02	INTER 42009748	-6.2%	0.1561E+06	0.2282E+06	888.8	-2873.
0.7671E-02								
-- CONSTANT TIME STEP FOR SOLID ELEMENT NUMBER 7001813								
18210	48.79	0.2431E-02	INTER 42009748	-6.2%	0.1562E+06	0.2281E+06	889.2	-2873.
0.7671E-02								
-- CONSTANT TIME STEP FOR SOLID ELEMENT NUMBER 7002310								
-- CONSTANT TIME STEP FOR SOLID ELEMENT NUMBER 7001709								
18220	48.82	0.2495E-02	INTER 42009748	-6.2%	0.1563E+06	0.2280E+06	888.3	-2872.
0.7671E-02								
18230	48.84	0.2607E-02	INTER 42009748	-6.2%	0.1564E+06	0.2279E+06	891.0	-2870.
0.7671E-02								

```

-- CONSTANT TIME STEP FOR SOLID ELEMENT NUMBER 7001821
-- CONSTANT TIME STEP FOR SOLID ELEMENT NUMBER 7002666
18240 48.87 0.2668E-02 NODE 10103704 -6.2% 0.1564E+06 0.2278E+06 893.2
-2869. 0.7671E-02
-- CONSTANT TIME STEP FOR SOLID ELEMENT NUMBER 7002205
18250 48.90 0.2665E-02 NODE 10103704 -6.2% 0.1565E+06 0.2277E+06 896.1
-2867. 0.7671E-02
18260 48.92 0.2663E-02 NODE 10103704 -6.2% 0.1566E+06 0.2276E+06 897.3
-2865. 0.7671E-02
-- CONSTANT TIME STEP FOR SOLID ELEMENT NUMBER 7001710
18270 48.95 0.2614E-02 INTER 42009748 -6.2% 0.1567E+06 0.2275E+06 897.7
-2863. 0.7671E-02
18280 48.98 0.2599E-02 INTER 42009748 -6.2% 0.1568E+06 0.2274E+06 895.9
-2861. 0.7671E-02
-- CONSTANT TIME STEP FOR SOLID ELEMENT NUMBER 7001702
18290 49.00 0.2655E-02 NODE 10103704 -6.2% 0.1568E+06 0.2273E+06 895.6
-2860. 0.7671E-02
18300 49.03 0.2736E-02 SH_3N 979131 -6.2% 0.1569E+06 0.2272E+06 896.7
-2859. 0.7671E-02

. . . . .

37100 99.69 0.2612E-02 INTER 42009748 -9.4% 0.2150E+06 0.1548E+06 1712.
-3241. 0.7671E-02
37110 99.71 0.2633E-02 INTER 42009748 -9.4% 0.2150E+06 0.1548E+06 1712.
-3239. 0.7671E-02
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 872981
37120 99.74 0.2631E-02 INTER 42009748 -9.4% 0.2150E+06 0.1549E+06 1711.
-3237. 0.7671E-02
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 876845
37130 99.77 0.2630E-02 INTER 42009748 -9.4% 0.2150E+06 0.1549E+06 1711.
-3235. 0.7671E-02
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 877165
37140 99.79 0.2627E-02 INTER 42009748 -9.4% 0.2150E+06 0.1549E+06 1710.
-3233. 0.7671E-02
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 872868
37150 99.82 0.2609E-02 INTER 42009748 -9.4% 0.2150E+06 0.1549E+06 1709.
-3231. 0.7671E-02
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 877277
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 877278
37160 99.84 0.2669E-02 INTER 42009748 -9.4% 0.2150E+06 0.1549E+06 1709.
-3229. 0.7671E-02
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 877051
37170 99.87 0.2671E-02 INTER 42009748 -9.4% 0.2150E+06 0.1549E+06 1708.
-3227. 0.7671E-02
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 876266
37180 99.90 0.2671E-02 INTER 42009748 -9.4% 0.2150E+06 0.1549E+06 1706.
-3225. 0.7671E-02
37190 99.92 0.2660E-02 INTER 42009748 -9.4% 0.2150E+06 0.1549E+06 1705.
-3224. 0.7671E-02
37200 99.95
0.2643E-02 INTER 42009748 -9.4% 0.2150E+06 0.1549E+06 1704. -3223. 0.7671E-02
37210 99.98 0.2643E-02 INTER 42009748 -9.4% 0.2150E+06 0.1549E+06 1703.
-3222. 0.7671E-02
ANIMATION FILE: DFWDS734_AMS_FULL_REWELD_NOSECT_OPT1A021 WRITTEN
37220 100.0 0.2623E-02 INTER 42009748 -9.4% 0.2150E+06 0.1549E+06 1703.
-3221. 0.7671E-02
RESTART FILES: DFWDS734_AMS_FULL_REWELD_NOSECT_OPT1_0001_[0001-0004].rst WRITTEN

-----
** CPU USER TIME **

```

ケース: AMSopt1_x13_16cpu_26h_110201sep30

受け入れ可能な/DT/AMS目標時間ステップ

参照時間ステップ/DT/NODA/CSTの12.5倍

本質的には、要素(SH3N)で決まる時間ステップで、例外的にインターフェース(INTER)時間ステップの影響があり、節点(NODE)で決まる時間ステップはありません。

(AMSの発散はなく、ジョブは40,230回目のサイクルで 100msが成功裏に終了しています)

CYCLE	TIME	TIME-STEP	ELEMENT	ERROR	I-ENERGY	K-ENERGY T	K-ENERGY R	EXT-
WORK	MAS.ERR	0	0.000	0.2487E-02 SH_3N	987177	0.0%	0.000	0.4134E+06

```

0.000 -0.1719E-10 0.7671E-02 ANIMATION FILE: DFWDS734 AMS FULL_REWELD NOSECT_OPTA001
WRITTEN 10 0.2487E-01 0.2487E-02 SH_3N 1004312 0.0% -11.02 0.4134E+06 -0.7503E-01
9.448 0.7671E-02 20 0.4975E-01 0.2487E-02 SH_3N 994772 0.0% -2.833 0.4135E
+06 0.2556 34.67 0.7671E-02 30 0.7462E-01 0.2487E-02 SH_3N 980477 0.0%
8.087 0.4135E+06 0.5928 73.10 0.7671E-02 40 0.9950E-01 0.2487E-02 SH_3N
980465 0.0% 25.51 0.4135E+06 1.253 121.5 0.7671E-02 50 0.1244
0.2487E-02 SH_3N 994783 0.0% 50.64 0.4135E+06 2.161 177.3 0.7671E-02
60 0.1492 0.2487E-02 SH_3N 983873 0.0% 81.66 0.4136E+06 3.542
238.2 0.7671E-02 70 0.1741 0.2487E-02 SH_3N 983929 0.0% 118.5 0.4136E
+06 5.751 302.3 0.7671E-02 80 0.1990 0.2487E-02 SH_3N 980233 0.0%
160.6 0.4136E+06 9.149 368.2 0.7671E-02 90 0.2239 0.2487E-02 SH_3N
980624 0.0% 206.9 0.4136E+06 13.47 434.9 0.7671E-02 100 0.2487
0.2487E-02 SH_3N 985772 0.0% 254.8 0.4136E+06 18.63 501.6 0.7671E-02
. . . . .
4980 12.39 0.2487E-02 SH_3N 983878 -0.7% 0.2624E+05 0.3855E+06 319.2 1427.
0.7671E-02 4990 12.41 0.2487E-02 SH_3N 983854 -0.7% 0.2633E+05 0.3854E+06 317.9
1422. 0.7671E-02 5000 12.44 0.2487E-02 SH_3N 980375 -0.7% 0.2642E+05 0.3852E+06
317.3 1416. 0.7671E-02>
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 9897228
5010 12.46 0.2487E-02 SH_3N 986833 -0.7% 0.2651E+05 0.3851E+06 317.1 1409.
0.7671E-02
5020 12.49 0.2487E-02 SH_3N 980402 -0.7% 0.2660E+05 0.3850E+06 316.0 1402.
0.7671E-02
5030 12.51 0.2487E-02 SH_3N 978799 -0.7% 0.2669E+05 0.3849E+06 316.4 1393.
0.7671E-02
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 9897051
5040 12.54 0.2440E-02 INTER 42009748 -0.7% 0.2679E+05 0.3848E+06 316.3 1384.
0.7671E-02
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 9897049
5050 12.56 0.2473E-02 INTER 42009748 -0.7% 0.2687E+05 0.3847E+06 316.3 1375.
0.7671E-02
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 9897202
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 9897044
5060 12.59 0.2487E-02 SH_3N 985187 -0.7% 0.2696E+05 0.3846E+06 317.1 1364.
0.7671E-02
5070 12.61 0.2487E-02 SH_3N 983885 -0.7% 0.2705E+05 0.3845E+06 318.2 1353.
0.7671E-02
5080 12.64 0.2487E-02 SH_3N 980507 -0.7% 0.2713E+05 0.3844E+06 319.4 1342.
0.7671E-02
. . . . .
40000 99.43 0.2487E-02 SH_3N 983740 -6.5% 0.2268E+06 0.1548E+06 1688. -3544.
0.7671E-02
40010 99.46 0.2487E-02 SH_3N 981895 -6.5% 0.2268E+06 0.1548E+06 1691. -3540.
0.7671E-02
40020 99.48 0.2487E-02 SH_3N 984028 -6.5% 0.2268E+06 0.1548E+06 1694. -3536.
0.7671E-02
40030 99.51 0.2487E-02 SH_3N 982888 -6.5% 0.2268E+06 0.1549E+06 1697. -3532.
0.7671E-02
40040 99.53 0.2487E-02 SH_3N 993482 -6.5% 0.2268E+06 0.1549E+06 1700. -3528.
0.7671E-02
40050 99.55 0.2487E-02 SH_3N 1002607 -6.5% 0.2268E+06 0.1549E+06 1703. -3525.
0.7671E-02
40060 99.58 0.2487E-02 SH_3N 986010 -6.5% 0.2268E+06 0.1549E+06 1706. -3521.
0.7671E-02
40070 99.60 0.2487E-02 SH_3N 981287 -6.5% 0.2268E+06 0.1549E+06 1708. -3518.
0.7671E-02
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 876247
40080 99.63 0.2487E-02 SH_3N 993747 -6.5% 0.2268E+06 0.1549E+06 1711. -3515.
0.7671E-02
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 876267
40090 99.65 0.2487E-02 SH_3N 969592 -6.5% 0.2268E+06 0.1549E+06 1712. -3512.
0.7671E-02
40100 99.68 0.2487E-02 SH_3N 985183 -6.5% 0.2268E+06 0.1549E+06 1713. -3510.
0.7671E-02
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 876245
40110 99.70 0.2487E-02 SH_3N 979126 -6.5% 0.2268E+06 0.1549E+06 1710. -3507.
0.7671E-02
40120 99.73 0.2487E-02 SH_3N 981287 -6.4% 0.2269E+06 0.1549E+06 1705. -3504.
0.7671E-02
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER 876374
40130 99.75 0.2487E-02 SH_3N 985787 -6.4% 0.2269E+06 0.1549E+06 1699. -3501.
0.7671E-02
40140 99.78 0.2487E-02 SH_3N 981843 -6.4% 0.2269E+06 0.1549E+06 1694. -3498.
0.7671E-02
40150 99.80 0.2487E-02 SH_3N 986153 -6.4% 0.2269E+06 0.1549E+06 1691. -3495.
0.7671E-02
40160 99.83 0.2487E-02 SH_3N 993115 -6.4% 0.2269E+06 0.1549E+06 1689. -3492.
0.7671E-02
40170 99.85 0.2487E-02 SH_3N 995959 -6.4% 0.2269E+06 0.1549E+06 1688. -3490.
0.7671E-02
40180 99.88 0.2487E-02 SH_3N 979140 -6.4% 0.2269E+06 0.1549E+06 1688. -3487.
0.7671E-02
40190 99.90 0.2487E-02 SH_3N 985244 -6.4% 0.2269E+06 0.1549E+06 1689. -3485.
0.7671E-02

```

```

40200 99.93 0.2487E-02 SH_3N 993949 -6.4% 0.2269E+06 0.1549E+06 1691. -3483.
0.7671E-02
40210 99.95 0.2487E-02 SH_3N 988714 -6.4% 0.2269E+06 0.1550E+06 1694. -3481.
0.7671E-02
40220 99.98 0.2487E-02 SH_3N 986153 -6.4% 0.2269E+06 0.1550E+06 1697. -3479.
0.7671E-02
ANIMATION FILE: DFWDS734_AMS_FULL_REWELD_NOSECT_OPTA021 WRITTEN
40230 100.0 0.2487E-02 SH_3N 980714 -6.4% 0.2269E+06 0.1550E+06 1698. -3477.
0.7671E-02
RESTART FILES: DFWDS734_AMS_FULL_REWELD_NOSECT_OPT_0001_[0001-0004].rst WRITTEN
-----
** CPU USER TIME **

```

ケース: AMSopt_x12.5_32cpu_17.8h_110201sep30

過少に予測された/DT/AMS目標時間ステップ

参照時間ステップ/DT/NODA/CSTの10倍

要素 (SH3N) で決まる時間ステップだけであることに注意してください。インターフェース (INTER) または節点 (NODE) で決まる時間ステップはありません (ジョブは成功裏に50,250回目のサイクルで 100msを終了しています)

CYCLE	TIME	TIME-STEP	ELEMENT	ERROR	I-ENERGY	K-ENERGY T	K-ENERGY R	EXT-WORK	
MAS.ERR	0	0.000	0.1990E-02 SOLID	1026809	0.0%	0.000	0.4134E+06	0.000	-0.1719E-10
	0.7671E-02								
			ANIMATION FILE: DFWDS734_AMS_FULL_REWELD_NOSECTA001 WRITTEN						
	10	0.1990E-01	0.1990E-02 SOLID	1027233	0.0%	-12.55	0.4134E+06	0.4509E-01	6.263
	0.7671E-02								
	20	0.3980E-01	0.1990E-02 SOLID	1026793	0.0%	-3.404	0.4134E+06	0.1923	22.77
	0.7671E-02								
	30	0.5970E-01	0.1990E-02 SOLID	1026919	0.0%	-0.3391	0.4135E+06	0.3412	48.73
	0.7671E-02								
	40	0.7960E-01	0.1990E-02 SOLID	1026987	0.0%	11.02	0.4135E+06	0.7014	82.15
	0.7671E-02								
	50	0.9950E-01	0.1990E-02 SOLID	1027291	0.0%	25.55	0.4135E+06	1.259	121.6
	0.7671E-02								
	60	0.1194	0.1990E-02 SOLID	1026789	0.0%	45.07	0.4135E+06	1.935	165.8
	0.7671E-02								
	70	0.1393	0.1990E-02 SOLID	1026910	0.0%	68.49	0.4136E+06	2.833	213.5
	0.7671E-02								
	80	0.1592	0.1990E-02 SOLID	1027497	0.0%	95.78	0.4136E+06	4.219	263.7
	0.7671E-02								
	90	0.1791	0.1990E-02 SOLID	1027432	0.0%	126.7	0.4136E+06	6.282	315.5
	0.7671E-02								
	100	0.1990	0.1990E-02 SOLID	1027197	0.0%	160.8	0.4136E+06	9.184	368.2
	0.7671E-02								
.....									
	6220	12.38	0.1990E-02 SOLID	1027341	-0.6%	0.2623E+05	0.3856E+06	304.8	1425.
	0.7671E-02								
	--	RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER		9897042					
	6230	12.40	0.1990E-02 SOLID	1026467	-0.6%	0.2630E+05	0.3856E+06	304.8	1422.
	0.7671E-02								
	6240	12.42	0.1990E-02 SOLID	1027168	-0.7%	0.2637E+05	0.3855E+06	303.9	1418.
	0.7671E-02								
	6250	12.44	0.1990E-02 SOLID	1026994	-0.7%	0.2645E+05	0.3854E+06	303.5	1413.
	0.7671E-02								
	6260	12.46	0.1990E-02 SOLID	1026918	-0.7%	0.2652E+05	0.3853E+06	302.8	1408.
	0.7671E-02								
	6270	12.48	0.1990E-02 SOLID	1027344	-0.7%	0.2659E+05	0.3852E+06	301.9	1402.
	0.7671E-02								
	--	RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER		9897040					
	6280	12.50	0.1990E-02 SOLID	1027487	-0.7%	0.2667E+05	0.3851E+06	300.8	1395.
	0.7671E-02								
	--	RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER		9897152					
	6290	12.52	0.1990E-02 SOLID	1027341	-0.7%	0.2674E+05	0.3850E+06	300.0	1388.
	0.7671E-02								
	6300	12.54	0.1990E-02 SOLID	1027156	-0.7%	0.2681E+05	0.3849E+06	299.5	1381.
	0.7671E-02								
	6310	12.56	0.1990E-02 SOLID	1027292	-0.7%	0.2688E+05	0.3849E+06	299.1	1372.
	0.7671E-02								
	--	RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER		9897037					
	6320	12.58	0.1990E-02 SOLID	1026512	-0.7%	0.2696E+05	0.3848E+06	299.1	1364.
	0.7671E-02								
	--	CONSTANT TIME STEP FOR SOLID ELEMENT NUMBER		7004883					

6330	12.60	0.1990E-02	SOLID	1027473	-0.7%	0.2702E+05	0.3847E+06	299.6	1355.
0.7671E-02									
6340	12.62	0.1990E-02	SOLID	1027340	-0.7%	0.2709E+05	0.3846E+06	300.6	1346.
0.7671E-02									
6350	12.64	0.1990E-02	SOLID	1027345	-0.7%	0.2716E+05	0.3845E+06	301.1	1337.
0.7671E-02									
.									
49970	99.44	0.1990E-02	SOLID	1026732	-7.5%	0.2226E+06	0.1550E+06	1683.	-3546.
0.7671E-02									
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER				878377					
49980	99.46	0.1990E-02	SOLID	1027394	-7.5%	0.2226E+06	0.1550E+06	1683.	-3543.
0.7671E-02									
49990	99.48	0.1990E-02	SOLID	1026474	-7.5%	0.2226E+06	0.1550E+06	1683.	-3541.
0.7671E-02									
50000	99.50	0.1990E-02	SOLID	1026918	-7.5%	0.2226E+06	0.1550E+06	1683.	-3538.
0.7671E-02									
50010	99.52	0.1990E-02	SOLID	1026842	-7.5%	0.2226E+06	0.1550E+06	1684.	-3536.
0.7671E-02									
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER				877707					
50020	99.54	0.1990E-02	SOLID	1026846	-7.5%	0.2226E+06	0.1550E+06	1684.	-3533.
0.7671E-02									
50030	99.56	0.1990E-02	SOLID	1026916	-7.5%	0.2226E+06	0.1550E+06	1685.	-3531.
0.7671E-02									
50040	99.58	0.1990E-02	SOLID	1026846	-7.5%	0.2226E+06	0.1550E+06	1686.	-3529.
0.7671E-02									
50050	99.60	0.1990E-02	SHELL	389951	-7.4%	0.2226E+06	0.1550E+06	1686.	-3526.
0.7671E-02									
50060	99.62	0.1990E-02	SOLID	1026916	-7.4%	0.2226E+06	0.1550E+06	1686.	-3524.
0.7671E-02									
50070	99.64	0.1990E-02	SOLID	1027698	-7.4%	0.2226E+06	0.1551E+06	1687.	-3522.
0.7671E-02									
50080	99.66	0.1990E-02	SHELL	389982	-7.4%	0.2227E+06	0.1551E+06	1687.	-3520.
0.7671E-02									
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER				877600					
50090	99.68	0.1990E-02	SHELL	390246	-7.4%	0.2227E+06	0.1551E+06	1688.	-3518.
0.7671E-02									
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER				872853					
50100	99.70	0.1990E-02	SOLID	1026474	-7.4%	0.2227E+06	0.1551E+06	1688.	-3515.
0.7671E-02									
50110	99.72	0.1990E-02	SOLID	1026911	-7.4%	0.2227E+06	0.1551E+06	1689.	-3513.
0.7671E-02									
50120	99.74	0.1990E-02	SOLID	1026914	-7.4%	0.2227E+06	0.1551E+06	1689.	-3511.
0.7671E-02									
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER				877814					
50130	99.76	0.1990E-02	SOLID	1026500	-7.4%	0.2227E+06	0.1551E+06	1690.	-3508.
0.7671E-02									
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER				875485					
50140	99.78	0.1990E-02	SOLID	1027163	-7.4%	0.2227E+06	0.1551E+06	1690.	-3506.
0.7671E-02									
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER				880641					
50150	99.80	0.1990E-02	SOLID	1026107	-7.4%	0.2227E+06	0.1551E+06	1690.	-3504.
0.7671E-02									
50160	99.82	0.1990E-02	SOLID	1027004	-7.4%	0.2227E+06	0.1551E+06	1691.	-3501.
0.7671E-02									
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER				877598					
50170	99.84	0.1990E-02	SOLID	1026998	-7.4%	0.2227E+06	0.1551E+06	1690.	-3499.
0.7671E-02									
50180	99.86	0.1990E-02	SHELL	390073	-7.4%	0.2227E+06	0.1551E+06	1690.	-3497.
0.7671E-02									
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER				877149					
50190	99.88	0.1990E-02	SHELL	254450	-7.4%	0.2227E+06	0.1551E+06	1690.	-3495.
0.7671E-02									
50200	99.90	0.1990E-02	SOLID	1026757	-7.4%	0.2227E+06	0.1551E+06	1690.	-3493.
0.7671E-02									
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER				880538					
50210	99.92	0.1990E-02	SOLID	1026603	-7.4%	0.2227E+06	0.1551E+06	1690.	-3491.
0.7671E-02									
50220	99.94	0.1990E-02	SOLID	1027433	-7.4%	0.2227E+06	0.1551E+06	1690.	-3489.
0.7671E-02									
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER				877599					
50230	99.96	0.1990E-02	SOLID	1026799	-7.4%	0.2227E+06	0.1551E+06	1690.	-3488.
0.7671E-02									
50240	99.98	0.1990E-02	SOLID	1027571	-7.4%	0.2227E+06	0.1551E+06	1690.	-3486.
0.7671E-02									
50250	100.0	0.1990E-02	SOLID	1027536	-7.4%	0.2227E+06	0.1552E+06	1690.	-3485.
0.7671E-02									
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER				872739					
ANIMATION FILE: DFWDS734_AMS_FULL_REWELD_NOSECTA021 WRITTEN									
-- RUPTURE OF SHELL ELEMENT NUMBER				872967					
RESTART FILES: DFWDS734_AMS_FULL_REWELD_NOSECT_0001_[0001-0004].rst WRITTEN									

```
** CPU USER TIME **
```

ケース: AMSnorm_x10_16cpu_33.7h_110201sep30

時間ステップスケールファクター

要素と節点の両方について理論的に安定な時間ステップは近似であり、後続の時間増分中に変化する可能性があります。

シミュレーションの安定性を保ち、発散を回避するために、計算された理論的安定時間ステップを時間ステップスケールファクター ΔT_{sca} で掛けます。時間ステップコントロールのオプションが使用されていない場合、Starter出力に出されるモデルの最小節点または要素時間ステップを時間ステップスケールファクターで掛け、Engine出力ファイル内のTIME-STEPとして結果が示されます。

Starter出力にリストされる最小時間ステップ:

```
SOLID ELEMENTS TIME STEP
-----
TIME STEP      ELEMENT NUMBER
2.6322377948203E-04    11021
```

Engineファイルでアクティブ化されるデフォルトの要素時間ステップ:

```
/DT
0.9 0
```

Engine時間ステップはここで

```
TIME-STEP = 0.9 * 2.6322377948203E-04 = 0.2369E-03
```

となり、これはEngine出力ファイルのサイクル0と合致します:

```
CYCLE    TIME      TIME-STEP  ELEMENT      SOLID
0         0.000      0.2369E-03  0.2369E-03  SOLID
```

/DT/NODA/CSTや/DT/BRICK/CSTといった時間ステップコントロール法のいずれかを使用する際、時間ステップコントロールは、メッシュの最小時間ステップに時間ステップスケールファクターを掛けたものが、入力された最小時間ステップ未満 $\Delta T_{sca} * \min(\Delta t_{mesh}) \leq \Delta T_{min}$ である際にアクティブ化されます。

Starter出力にリストされる最小時間ステップ:

```
NODAL TIME STEP (estimation)
-----
TIME STEP      NODE NUMBER
6.9475433E-07    10009
```

一定節点時間ステップオプションがEngineファイルで使用される場合:

```
/DT/NODA/CST
0.9 7.0E-07
```

初期Engine時間ステップは:

$$\text{Initial Time Step} = 0.9 * 6.9475433E - 07 = 0.6253E - 06 \quad (11)$$

この初期時間ステップが $\Delta T_{min} = 7.0E - 7$ 未満であるため、メッシュの理論的時間ステップを大きくするために質量が付加されます。 $\Delta T_{sca} * \min(\Delta t_{mesh}) \leq \Delta T_{min}$ となるよう、最小メッシュ時間ステップを大きくするために十分な質量を付加する必要があります。すなわち:

$$\min(\Delta t_{\text{mesh}}) = \frac{\Delta T_{\text{min}}}{\Delta T_{\text{sca}}} = \frac{7.0E-07}{0.9} = 0.7778E-06 \quad (12)$$

Engine出力は、時間ステップが入力されたものと同じであり、時間ステップを大きくするために付加された質量のせいで質量エラー(MAS.ERR)があったことを示しています。

CYCLE	TIME	TIME-STEP	ELEMENT	...	MAS.ERR
0	0.000	0.7000E-06	NODE 10009		0.2887E-01
1	0.7000E-06	0.7000E-06	NODE 10009		0.2887E-01
2	0.1400E-06	0.7000E-06	NODE 10009		0.2887E-01

$\Delta T_{\text{sca}} = 0.67$ である場合、メッシュの理論的時間ステップをより大きくするために、更に多くの質量を付加する必要があります。

$$\min(\Delta t_{\text{mesh}}) = \frac{\Delta T_{\text{min}}}{\Delta T_{\text{sca}}} = \frac{7.0E-07}{0.67} = 1.0448E-06 \quad (13)$$

デフォルトの時間ステップスケールファクターである0.9はほとんどのケースで良好に機能しますが、場合によってはこれ以外の値が推奨されます。1つの例として、[図 15](#)に示すように剛性が急激に増大するフォーム材を含んだモデルが挙げられます。

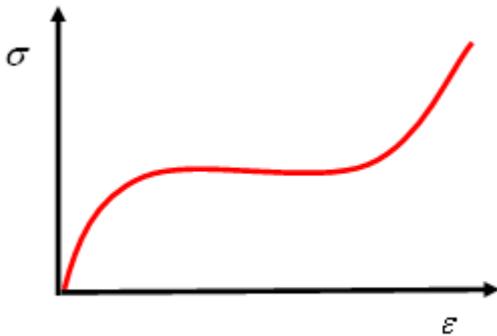


図 15: フォーム材の典型的な挙動

この剛性の増大により、モデルの限界時間ステップが小さくなり、シミュレーションの時間ステップがモデルの限界時間ステップを上回った場合、発散を生じる可能性があります。0.9以外の時間ステップが使用される一般的なケースは：

1. 時間ステップを大きくするためにアドバンスドマススケーリング/DT/AMSを使用しているモデル: $\Delta T_{\text{sca}} = 0.67$
2. フォーム材を含むモデル: $\Delta T_{\text{sca}} = 0.66$
3. 1要素のモデル: $\Delta T_{\text{sca}} = 0.1$
4. 2有限要素のモデル: $\Delta T_{\text{sca}} = 0.2$
5. 3つより多くの有限要素を有するモデル: $\Delta T_{\text{sca}} = 0.9$
6. 1.0より大きいスケールファクターは用いることができません。

一般的な推奨事項

各時間ステップコントロール手法には利点と制限があります。

使用される手法がシミュレーションに適用するかどうかを検証するには、正しい工学的判断を用いる必要があります。判別が見つからない場合は、時間ステップコントロールなしのシミュレーションを時間ステップコントロールありのシミュレーションと比較し、結果が許容範囲にあるか確認します。

構造ダイナミクスシミュレーション

節点時間ステップとマススケーリング

不均一なメッシュの場合、節点時間ステップ法は要素法と比べて少し高めな時間ステップを呈します。これは、下記を用いてデフォルトのオプションでアクティブ化できます：

```
/DT/NODA
0.9 0
```

ほとんどのシミュレーションは、最も低い時間ステップで少量の質量を節点に追加することから恩恵を受けています。下記のオプションは節点時間ステップをアクティブ化し、入力された最小時間ステップに見合うよう質量が追加されます：

```
/DT/NODA/CST
0.9  $\Delta T_{\min}$ 
```

リーズナブルな量の質量を付加する特定の時間ステップを求めるプロセスは、質量スケーリングなしに短時間モデルを実行してシミュレーションの時間ステップを見出すことによって行われます。これは、シミュレーションの実行にどれだけかかるかをRadiossが推測するための良い時間です。次に、入力された時間ステップを増やし、モデルを再度実行して、追加された質量の量をメモします。シミュレーションの最初にリーズナブルな量のこのプロセスを進めます。シミュレーションに応じて、より多くの質量が追って追加されます。ここで、入力された時間ステップの別の修正が必要となります。

実行時間を短縮するためにモデルに追加されるべき適切な量の質量を決定するには、正しい工学的判断が使用されなくてはなりません。追加する質量が多すぎると、降下の物理やシミュレーションに影響を与えかねません。これは、解析されるオブジェクトが実際のパートよりも重みがあるためです。一般的に、追加される質量は5%未満にすることが推奨されますが、特定のシミュレーションではこれ以上でも受容される場合があります。

シミュレーションをコントロールする接触インターフェース

シミュレーション内で接触が最小時間ステップを有する際、Engine出力はINTERと、最小時間ステップを有する接触インターフェース番号をリストします。これは、1つのサイクル内でセカンダリ節点がメインセグメントを通過するのを回避するために時間ステップが小さくされたことを示しています。接触は時折、シミュレーション中に最小時間ステップを有することがあります。

しかしながら、延長された時間の量について接触が時間ステップをコントロールする場合、以下の可能性を調査する必要があります。

- モデル内の初期交差
- モデル内の正しくない貫通
- 接触剛性をソフトにし過ぎてしまう正しくない材料定義
- 微小な接触板厚またはギャップ

もう一つの可能なソリューションとして、/DT/INTER/DELを使って、時間ステップの減少の原因となっているセカンダリ節点を接触から取り除きます。これは、/DT/NODA/CSTで使用されている ΔT_{\min} よりも/DT/INTER/DEL ΔT_{\min} を0から100倍少なくなるよう設定することで行われます。

微小ひずみ定式化への切り替え

デフォルトの大ひずみ定式化が使用されている場合、ソリッド要素の大変形が時間ステップの減少の要因となり得ます。これが起こらないようにするには、そのプロパティが $I_{smstr} SMSTR = 2$ または12である要素について入力された最小時間ステップにおける微小ひずみ定式化に/DT/BRICK/CSTを使って切り替えます。

例: /DT Engine入力

典型的なシミュレーションの場合、下記の時間ステップコントロールコマンドの組み合わせを使うと、シミュレーション内でリーズナブルな時間ステップを保持する助けとなります。

```
/DT/NODA/CST  
0.9  $\Delta T_{min1}$   
/DT/BRICK/CST  
0.9  $\Delta T_{min2}$   
/DT/INTER/DEL  
0.9  $\Delta T_{min3}$ 
```

ここで、 ΔT_{min2} は ΔT_{min1} の2~4倍小さく、 ΔT_{min3} は ΔT_{min1} より100倍小さい。

準-静的解析

準-静的解析には、従来の節点マススケーリング /DT/NODA/CSTまたはアドバンスドマススケーリング /DT/AMSが使用できます。イベントがスローである場合は、節点マススケーリングのより大きな量を使用すると、結果に影響を与えません。もしくは、推奨毎の /DT/AMSがよく機能します。

2. Courant, Richard, Kurt Friedrichs, and Hans Lewy. "On the partial difference equations of mathematical physics." *Mathematische Annalen* 100 (1928): 32-74

有限要素

連続体の力学に基づき、3次元ソリッドは以下のカテゴリーに分類できます。ソリッドの寸法がR、Lとtで、板厚 t に対して、Lが作業方向で、Rが曲率半径の場合、次のように書くことができます：

- $L/t > 20$ かつ $R/t > 20$ の場合：薄肉シェルの仮定が有効(KirchhoffまたはMindlinシェルモデル)
- $10 < L/t < 20$ かつ $10 < R/t < 20$ の場合：Moderately 厚肉シェル(Mindlin モデル)
- $4 < L/t < 10$ かつ $4 < R/t < 10$ の場合：厚肉シェル
- $L/t < 4$ または $R/t < 4$ の場合：ソリッド

それぞれのケースに対し、適合する有限要素が次に適用されます：

- シェル理論：中立面の2Dメッシュ
- 厚肉シェル：一定法線方向応力の仮定での3Dメッシュ
- ソリッド：一定法線方向応力の仮定が無い3Dメッシュ

Radiossではこれらすべての定式化が可能です。与えられたメッシュに対して、次に関していくつかの種類の定式化が適用可能です：

- 積分点の数
- 応力更新の方法
- 大ひずみまたは微小ひずみの仮定
- ネッキングと材料則積分のための塑性オプション
- 要素のタイプとアワグラス定式化

ソリッド要素(/PROP/SOLID)

Radiossでは線形と2次の補間関数の6面体と4面体のソリッド要素が利用可能です。

線形要素が、特に少ない数の積分点数と大きな時間ステップ ($\Delta t = \frac{L}{c}$) のために、時間ステップとメモリ消費に関して優れています：

- TETRA4: $L = a\sqrt{\frac{2}{3}} = 0.816a$
- TETRA10: $L = a\frac{\sqrt{5/2}}{6} = 0.264a$
- BRICK8: $L = \frac{Volume}{largest\ face\ area}$
- BRICK20: $L \approx \frac{thickness}{2}$

表 5 は、これらの要素の違いをまとめたものです。BRICK8に関しては、共回転定式化の使用についてElement LibraryRadioss理論マニュアル;で説明されており、これで、特に大きなせん断変形を受けるときの、更新過程での誤差の累積を避けることができます。この定式は、この要素のデフォルトとしては用いられていないため、ユーザーがアクティブ化する必要があります。

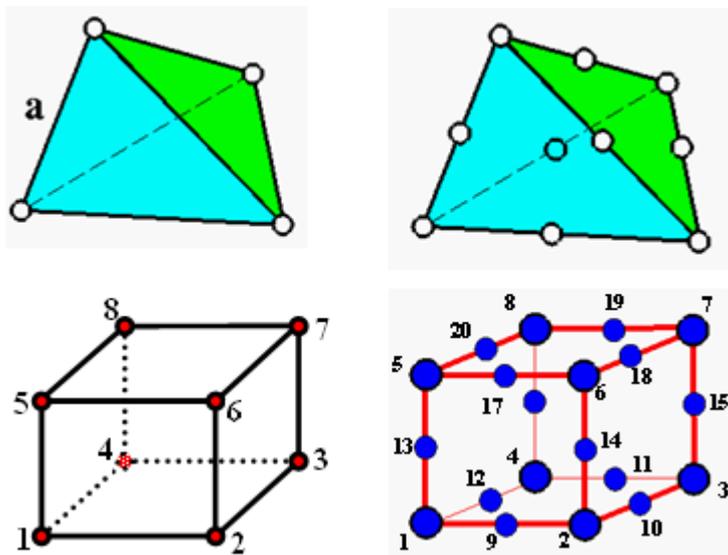


図 16: Radiossでのソリッド有限要素メッシュ

ソリッド要素はメッシング上の問題を解決するため縮退させることができます。縮退要素は、同じ辺上の節点をマージする(6面体)かまたはTETRA10の中間節点を削除することにより得られます。縮退要素の使用は推奨できませんが、複雑な形状のためにそれが避けられない場合、一様な質量分布を保つため要素の対称性を考慮することが重要です。図 17に、縮退されたソリッド要素のいくつかの例を示します。

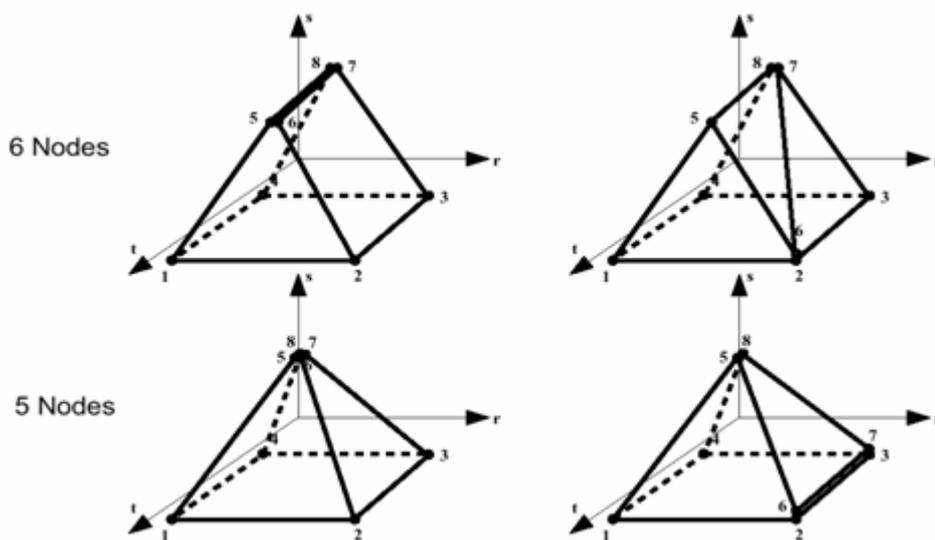
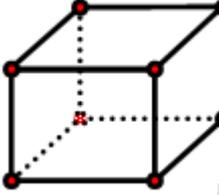
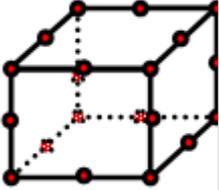
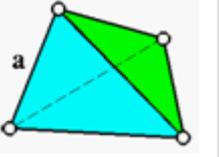
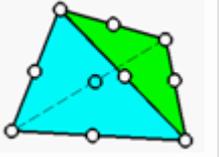


図 17: ソリッド要素縮退の例

表 5: ソリッド要素

メッシュ	要素名	積分点の数	アウグラス定式化	コメント
	BRICK8	1x1x1 2x2x2	1積分点に対する ペナルティ	共回転定式化を使用 アウグラストイプ2は避ける
	HA8	2x2x2 から 9x9x9まで	---	値はフラグ I_{CPRE} に対して用いられる点に注意
	HEPH	1x1x1	物理的な安定化	
	BRICK20	2x2x2 または 3x3x3	---	コストが高すぎる要素
	TETRA4	1	---	大変形でのせん断ロッキング 低精度の要素
	TETRA10	4	---	高いコスト せん断ロッキングは無く良い精度

ソリッド-シェル要素 (/PROP/TSHELL)

要素HA8、HEPH、およびBRICK20は板厚方向の一定応力を設定することによりソリッド-シェル要素に変換することができます。

この仮定で、板厚方向に1要素だけが用いられる厚肉シェルのモデル化に適したソリッド要素を得ることができます。加えて、これらの要素に対して、SHELL16とPA6が別のソリッド-シェル要素として利用可能です。

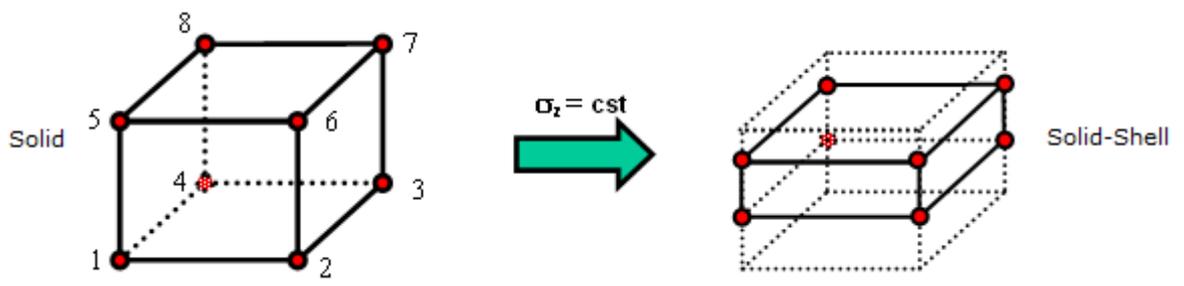
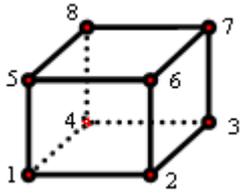
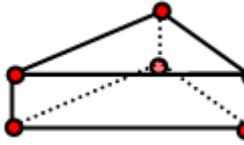
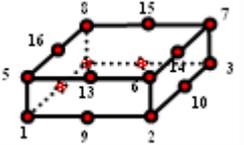


図 18: ソリッド対ソリッド-シェル

表 6: ソリッド-シェル要素

メッシュ	要素名	積分点の数	アウグラス定式化
	HSEPH	面内: 1 厚さ方向: 9まで	物理的な安定化
	HA8	2x2x2から9x9x9まで	---
	PA6	面内: 1 厚さ方向: 9まで	---
	SHELL16	面内: 3x3 または 2x2 厚さ方向: 9まで	---

ソリッド-シェル要素、特に、SHELL16は大きな結合部分のある厚肉シェル構造をモデル化するのに有用です(図 19)。板厚と材料特性に関しては、2節点間の最短距離に比例して時間ステップは小さくなり得ます。

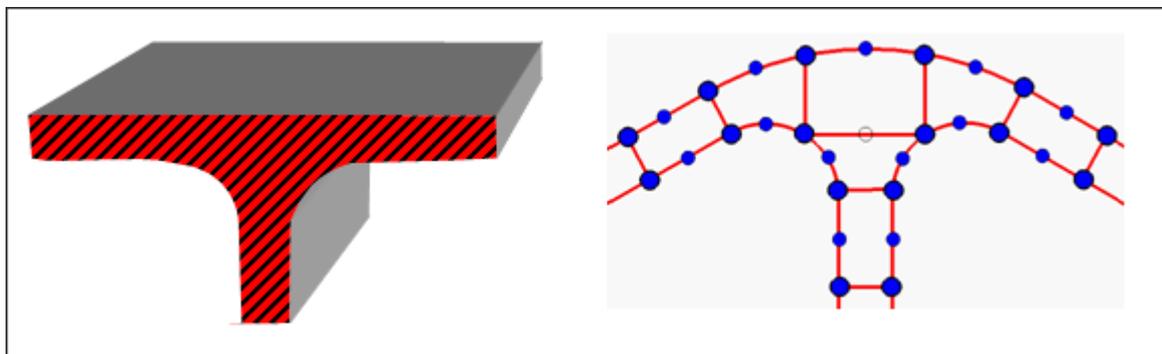


図 19: ソリッド-シェル要素の適用

シェル要素

シェル要素 (/PROP/SHELL)

シェルは曲率を持つ中立面と板厚 h で定義され、板厚は他の2つの寸法に比べて非常に小さいことが想定されています。シェル要素は最も一般的な要素で、自動車の衝突モデルの少なくとも90%はシェル要素からなっています。

これらは膜、曲げ、およびせん断を含んでおり、板厚方向の直応力は常に0です。

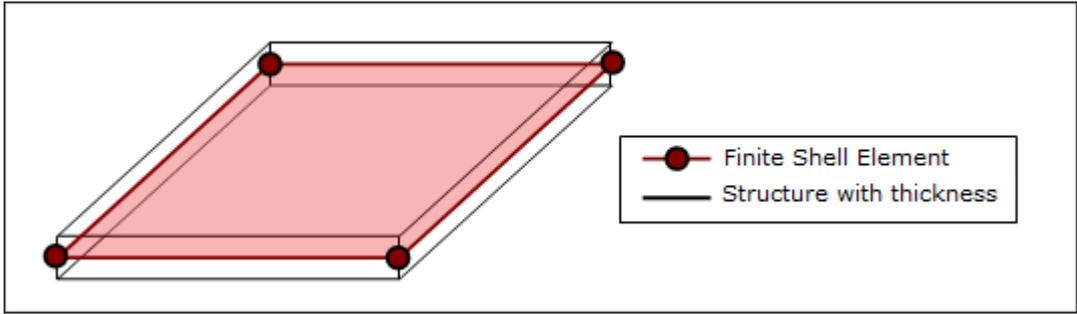


図 20: シェル要素

Radiossでは、標準のシェル要素は横せん断変形のあるMindlin板要素です。これらの要素は、横せん断による変形を考慮せず、中立面に直交する平面が変形の間も直交を保つ標準のKirchhoff要素よりも精度は高くなります。

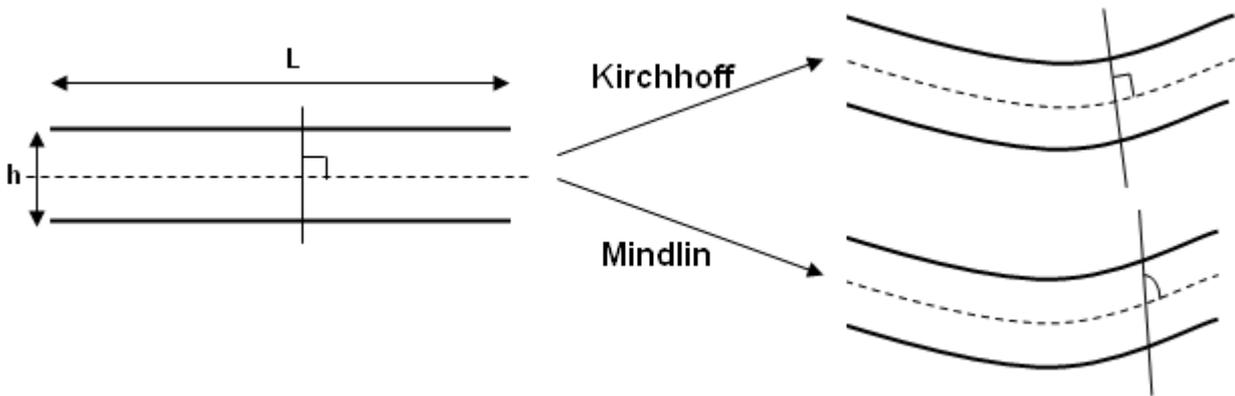


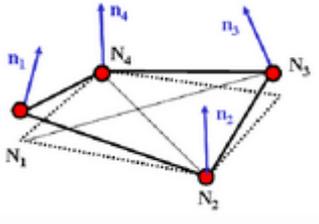
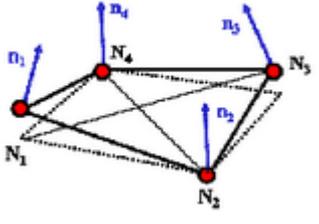
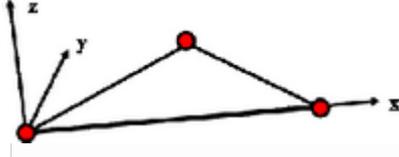
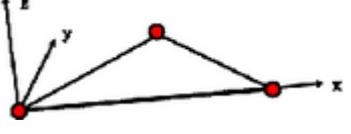
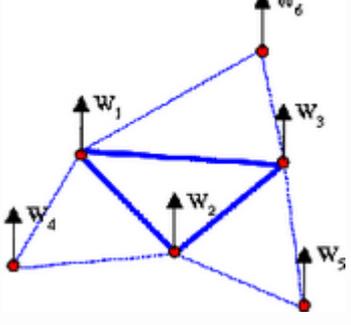
図 21: シェルモデル

Kirchhoffモデルは精度的に劣っていても、 L/h の比が20より大きい場合、このKirchhoffによる条件は正確です。しかし L/h の比が10と20の間の場合、中立面に直交する平面が変形の間も直交するという仮定条件は成り立たず、横せん断ひずみを考慮したMindlin板要素の使用を考えるべきです。Radiossでは、低減積分シェル要素(4節点および3節点シェルの両方)は Mindlinの仮定に基づいています。要素の中立面を節点からオフセット可能にする特定の定式化はないため、薄肉構造を中立面上で離散化することは非常に重要です。

シェル要素の定式化は衝突解析では非常に重要な役割を持ちます。Radiossのシェル要素は主にMindlin-Reissnerシェル理論に基づいています。この定式化はやや厚いシェルと薄いシェルに対して有効です。低減積分要素が、そのコストの低さから最もよく使われています。

表 7: シェル要素ライブラリ

メッシュ	要素名	積分点の数	アワグラス定式化	コメント
	BT (古典的なQ4)	1	ペナルティ法に基づいた4タイプ	一定法線ベクトルアワグラス定式化タイプ 3と4がデフォルトで用いられるタイプ1よりもずっと優れる

メッシュ	要素名	積分点の数	アワグラス定式化	コメント
	QEPH	1	物理安定化	節点での法線ベクトル 出力にアワグラスエネルギーなし
	QBAT	2x2	完全積分要素	節点での法線ベクトル アワグラスエネルギーなし
	C0	1	---	平面要素 アワグラスエネルギーなし
	DKT18	3	---	Kirchhoff シェル (薄肉シェルのみ) 高い t/Lでは低い時間ステップ
	S3N6	1	---	Kirchhoff シェル (薄肉シェルのみ) 回転自由度なし 側面の回転は隣接要素の 鉛直変位により定められる

与えられた適用分野に対するシェル要素の選択には経験が必要とします。以下の一般的なガイドラインが手助けになるかも知れません:

- BTは単純で効率的で低コストです。低減積分要素はメッシュの品質にそれほど敏感ではなく、粗いメッシュの場合に用いることができます。
- 準-静的解析、細かいメッシュ、反ったサーフェス、座屈の場合には、QEPHまたはQBAT要素の使用を推奨します。
- QBATは、Radiossで最も高精度の要素です。しかしながら、完全積分要素で、そのコストはBT要素の2から3倍になります。
- QEPHはコストと品質から最高の妥協点になります。一般的に、コストはBT要素の15%増し以下で、この要素で得られる結果はQBATに近いものになります。

- 三角形は推奨しません。C0要素は硬く、DKT18は高コストになります。高い品質を保証するためにはメッシュの中の三角形の全数は一般的に5%に制限されます。
- S3N6は、曲げに関してDKT18同様良い挙動を示します。これはスタンピングのシミュレーションの様な特定の適用分野に用いることができます。

結果の品質とメッシュの関係を図的に図 22に示します。

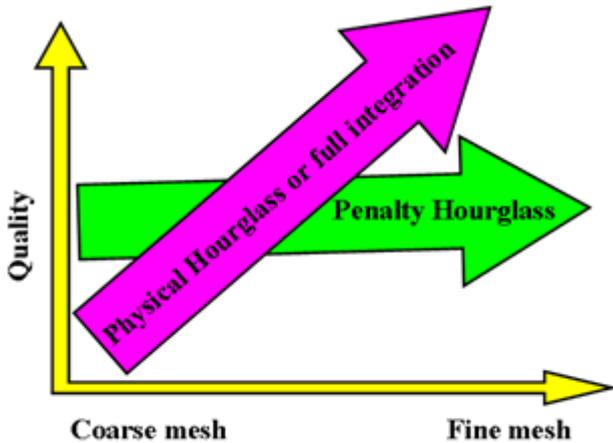


図 22: 異なるメッシュに対するシェル定式化の利用

板厚方向の積分

弾性シェルでは、板厚方向の直応力の変化は線形になります、このため、内部エネルギーは解析的な積分で得ることができます。塑性の場合は、応力分布が非線形となり、その非線形性を考慮するためには少なくとも3積分点が必要になります。応力の非線形分布はいくつかの付加された積分点で値を測定することにより近づくことができます。内部エネルギー推定の品質は積分点の数とコストに依存します。コストと品質の良い妥協点は、材料の非線形性と板厚と曲げの比を考慮するとにより見つけることができます。積分点の数は、Radioss V5xで10点まで増加されました。特に板厚が2mm以上の場合、5積分点の使用はより良い結果をもたらしますが、CPU時間の増加は無視できなくなります。曲げと横せん断のない膜要素のモデル化には1積分点のみの使用で十分です。弾性材料(LAW1)では、解析的計算によりこのオプションは無視されます。

弾性材料の膜要素を得る1つの方法は弾塑性材料則(Johnson-Cook則)を非常に高い降伏応力(例えば: $1e+30$)で用いることです。 $1e+30$

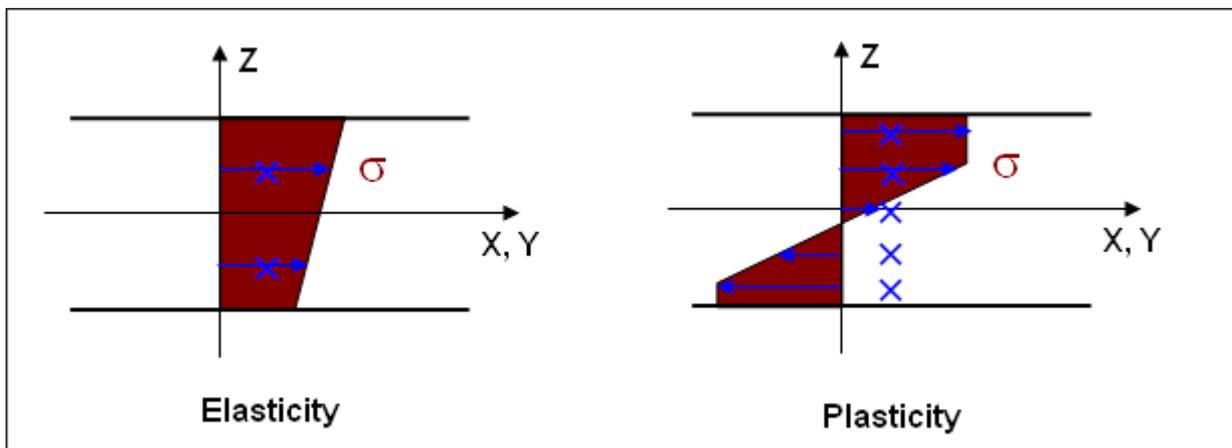


図 23: シェル断面の直応力分布

十分な精度を低いCPUコストで得る1つの方法はグローバル積分を用いることです。これはvon Mises塑性基準をいわゆるIlluyshin基準に変換することからなり、積分点での応力成分は内力(N、M、Tなど)に置き換えられます。

多層シェル要素では、それぞれの層の中心で1積分点が割り当てられます。

 注：2層のみの複合材では、更なる層を(全体の板厚に対して)十分な数の積分点数を得るために追加する必要があります。

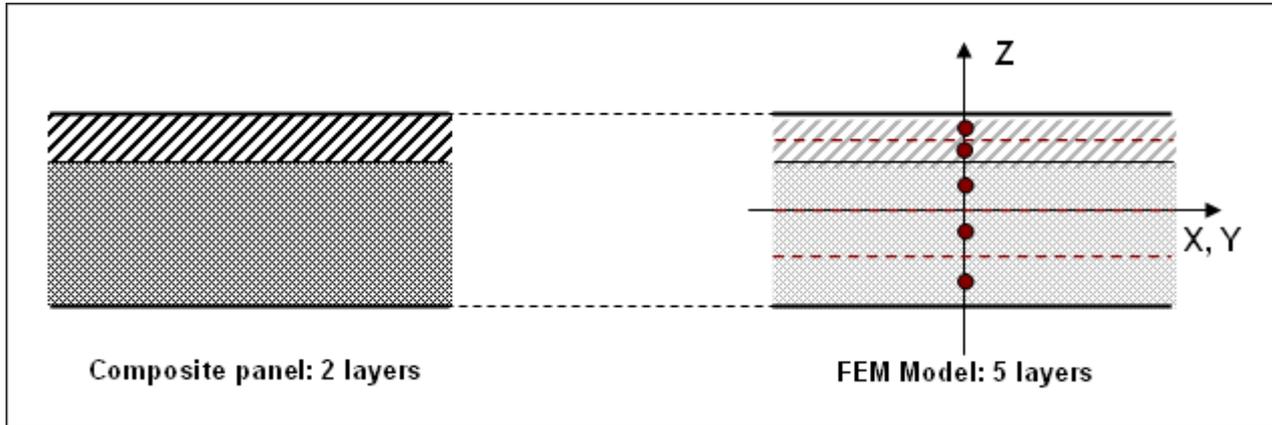


図 24: 複合材の積分点数を定義する層定義

反復塑性投影

塑性の計算では、2つの基本的な仮定を満足する必要があります。最初に、塑性領域の応力は塑性の基準を検証する必要があります(例えば von Mises 基準)。2番目に、主応力空間で加工硬化による方向($\Delta\sigma$)は、降伏局面に直交することです。

デフォルトでは、ラジアルリターンが降伏局面に投影する応力テンソルに適用されます。この方法は良い方法ですが、塑性は近似で2番目の仮定が常に満足されるわけではありません(図 25)。反復直交投影も利用可能で、この方法では2番目の仮定も反復アルゴリズムにより満足させることができます(*Radioss Theory Manual*のShell Elementsを参照)。投影後の応力分布に高い精度が必要な場合には反復投影を用いてください。残留応力やスプリングバックが必要なならばこの場合になります。主応力成分の差が大きい時(例えば純せん断の場合)はラジアルリターンの誤差が高くなります。

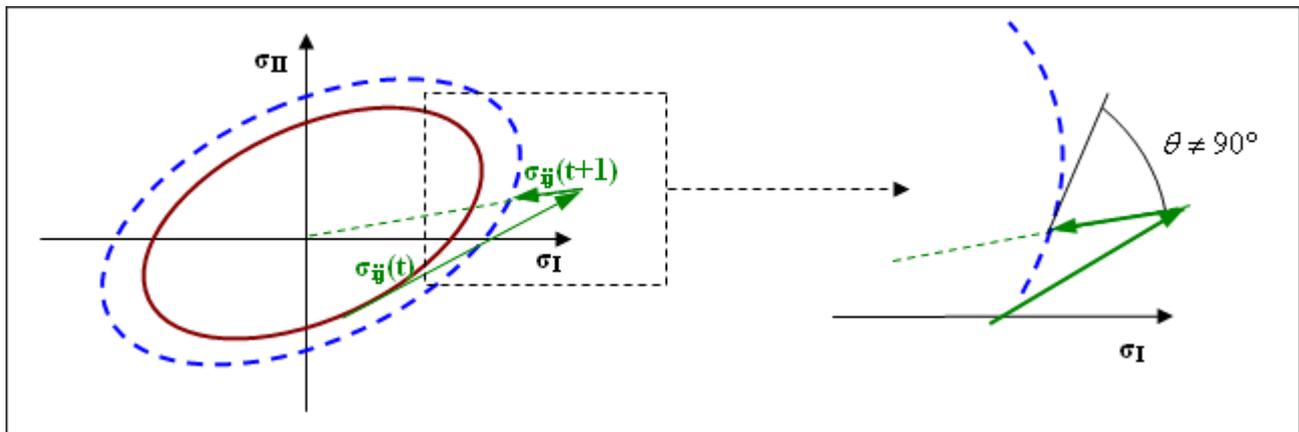


図 25: ラジアルリターン

板厚変化

デフォルトでは、シェルの板厚は変形の間一定として取り扱われます。初期板厚がひずみの計算と応力の積分に用いられますが、ポストプロセスの理由から板厚変化は計算されます。可変板厚 ($I_{thick} THICK = 1$) が用いられた場合、真の板厚がポストプロセッシングだけでなく、ひずみの計算と応力積分にも用いられます。

コメント

1. 結果の精度のためには、特にネッキングまたはスプリングバックの時は、反復塑性投影と板厚変化を用いることが強く推奨されます。

要素オプションのガイドライン

次の表は、要素定式化オプションの選択におけるいくつかの一般的な推奨事項を示しています。

適用分野	材料	プロパティ	アワグラス	積分点の数	板厚	塑性
基本的な衝突	2	1	1	0(グローバル)	定数	半径方向
台形のラップされたシェルとグローバル回転を伴う衝突	2	1	3(c)またはQEPH	0(グローバル)	定数	半径方向
スプリングバック(中精度)を伴う衝突	2/36	1	1	3	定数	反復
スプリングバック(高精度)を伴う衝突	2/36	1	3(c)またはQEPH	3	変数	反復
材料破壊(延性破壊)を伴う衝突	2/36(a)	1	1	5	変数	反復
高品質な衝突	2/36(a)	1	3(c)またはQEPH	5	変数	反復
材料破壊(脆性破壊)を伴う衝突	27	11	1	3/5	変数	反復
フロントガラス	27	11	1	3+1+3(b)	変数	反復
膜または布	1/2/19/36	1	1	1	定数/変数	半径方向/反復
複合材	25	9/10/11	1	1~30	未使用	未使用

適用分野	材料	プロパティ	アワグラス	積分点の数	板厚	塑性
局所的なアワグラス励起を用いたモデル	2/...	1	3(c)またはQEPH	0/3/5		
低塑性および低速度のモデル	2/...	1	3(c)またはQEPH	3/5		

1. 可変板厚と反復塑性により、ネッキング破壊をモデル化することができます。材料の硬化は正確である必要があります。
2. ガラス、プラスチック、およびガラス製フロントガラス(3つのガラス層、1つのプラスチック層および3つのガラス層)に対応。精度の低い、2+1+2も使用できます。より複雑なガラスプラスチック製のフロントガラスの場合は、より多くの層を使用することができます。
3. 弾塑性アワグラス(3)を使用する場合は、 hm と hf に0.1を使用し、 hrl にデフォルトを使用することを推奨します。

ビーム要素(/PROP/BEAM, /PROP/INT_BEAM)

Radiossでは2種類のビーム要素が利用可能で、1次元構造とフレームに用いられます。これは軸力、せん断力、曲げ、およびねじりモーメントを伝達します(反対にトラスは軸力のみ支持します)。

古典的ビーム(/PROP/BEAM)

デフォルトの定式化はTimoshenko定式化に基づいているため、横せん断ひずみが考慮されます。この定式化は横せん断エネルギーを無視する通常のEuler-Bernoulli定式化に縮退させることができます。

節点1と2が局所x-軸の定義に用いられます。局所y-軸はx-軸に直角で、 $t=0$ における節点1、2、3の平面内に置かれます。次に、平均のx-軸周りの回転を考慮して、それぞれのサイクルで位置は修正されます。局所z-軸は右手則を用いて得られます。

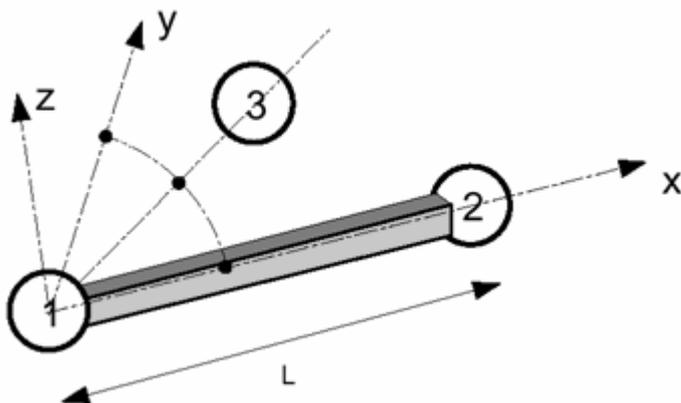


図 26: ビーム要素と局所座標系

Radiossではビーム形状はその断面積と3つの断面積慣性モーメントで定義されます。局所Y軸とZ軸に関する面積慣性モーメントは曲げのために、次の式を用いて計算できます:

$$I_y = \iint_A z^2 dy dz \quad (14)$$

$$I_z = \iint_A y^2 dy dz \quad (15)$$

局所X軸に関する面積慣性モーメントはねじりのためです。これは単純に、 I_y と I_z の和として得ることができます。ねじりモデルは中実断面で反りが無視できる場合のみ有効です。

ビーム要素の最小時間ステップは次の式を用いて決められます：

$$\Delta t = \frac{aL}{c} \quad (16)$$

ここで、

$$c \quad \text{音速} \\ \sqrt{E/\rho}$$

$$a = \frac{1}{2} \min\left(\sqrt{\min\left(4, 1 + \frac{b}{12}\right)} \cdot F_1, \sqrt{\frac{b}{3}} \cdot F_2\right)$$

$$F_1 = \sqrt{1 + 2d^2} - \sqrt{2}d$$

$$F_2 = \min\left(F_1, \sqrt{1 + 2d_s^2} - \sqrt{2}d_s\right)$$

$$b = \frac{AL^2}{\max(I_y, I_z)}$$

$$d = \max(d_m, d_f)$$

$$d_s = d \cdot \max\left(1, \sqrt{\frac{12}{b}} \cdot \sqrt{1 + \frac{12E}{5Gb}(1 - I_{shear})}\right)$$

ビーム断面を定義するユーザー入力パラメータは3つの面積慣性モーメントと断面積です。安定性と精度のために、次の制限を尊重することが推奨されます：

$$L > \sqrt{A} \quad (17)$$

$$0.01A^2 < I_y < 100A^2$$

$$0.01A^2 < I_z < 100A^2$$

$$0.1(I_y + I_z) < I_x < 10(I_y + I_z)$$

ビーム要素には材料則1と2のみ利用可能です。材料則2では、内力の関数にグローバル塑性モデルが使用されます。主要な仮定は、ビーム断面が中実で矩形であることです。断面と断面のモーメントの間の最適な関係は：

- $12I_y I_z = A^4$
- $I_x = I_y + I_z$

このモデルは円形または楕円断面に対しても良い結果を与えます。薄肉断面に対しては、グローバル塑性モデルは誤った結果を与えるかもしれません。フレーム構造の1つのラインに対し1つのビーム要素を用いることは推奨しません。質量は節

点に集中されます。そのため、正しい質量の分布を得るためには、細かいメッシュが必要です。これは特に動的効果が重要な場合には顕著になります。

加えて、Radiossビーム要素では、モーメントがビームの長さ方向に変化しません。モーメントは一定であるという仮定の下でビームの中心で評価されます。応力も同様です。

その結果として、固定された単純梁では、モーメントがビームのつけ根ではなく中央で計算されるために、ビームに若干高い力を生みます。

注: ビーム要素の出力は局所座標系で表現されます。いくつかの結果において、それが平均X回転の考慮によって更新されるために、混乱を生じるかもしれません。例えば、ビームの1節点が完全に固定され、速度Vが他節点に与えられている場合、ビームはVの速度で回転しますが、局所座標系は速度V/2で回転します。これは、特にせん断力や曲げモーメントに間違った解釈を引き起こすかもしれません。

新しいビーム (/PROP/INT_BEAM)

要素の断面は100 までの積分点を用いて定義されます(図 27)。要素の断面特性、面積慣性モーメントと面積はRadiossによって次のように計算されます:

$$A = \sum A_i = \sum (dy_i dz_i) \quad (18)$$

$$I_z = \sum A_i \left(y_i^2 + \frac{1}{12} dy_i^2 \right) \quad (19)$$

$$I_y = \sum A_i \left(z_i^2 + \frac{1}{12} dz_i^2 \right) \quad (20)$$

ビームモデルは横せん断ひずみを考慮してねじりの反りはないTimoshenko理論に基づいています。深いビーム(短いビーム)の場合に用いることができます。断面積に複数の積分点を用いることで、それぞれの積分点で von Mises基準での弾塑性モデルを得ることを可能にし、古典的なビーム要素と異なり、断面は部分的に塑性化することができます(TYPE3)。材料則1と2に加えて、材料則36も用いることができます。しかしながら、要素は長さ方向には1積分点のみ持つため、フレーム構造の1つの線に1要素を用いることは、深さ方向だけでなく長さ方向の塑性の進展を考慮するために、推奨されません。

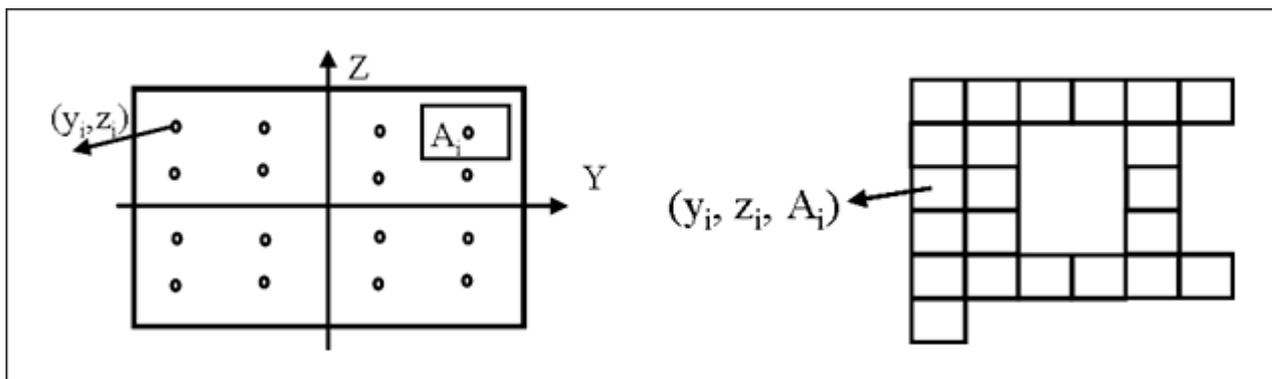


図 27: 積分ビームの断面定義

スプリング要素

剛性定式化

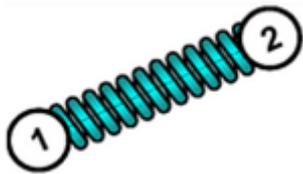
スプリングの剛性は、それぞれ異なって定義された自由度で複数の方法で定義されます。

力とモーメント

線形剛性と減衰の挙動

最もシンプルな定式化は線形弾性スプリング剛性で、ここでは内力が相対変位に比例します。この場合、定数の剛性パラメータ K_i およびオプションの減衰パラメータ C_i のみが入力されます。

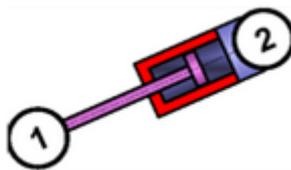
線形剛性の場合、力とモーメントは：



$$F(\delta) = K_i \delta^i$$

$$M(\theta) = K_i \theta^i$$

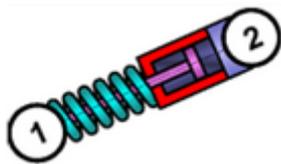
線形ダッシュポットの場合、力とモーメントは：



$$F(\delta) = C_i \delta^i$$

$$M(\theta) = C_i \theta^i$$

線形ダッシュポットおよびダッシュポットの場合、力とモーメントは：



$$F(\delta) = K_i \delta^i + C_i \delta^i$$

$$M(\theta) = K_i \theta^i + C_i \theta^i$$

非線形挙動

スプリングの力とモーメントは次のように計算されます：

$$F_i(\delta^i) = f\left(\frac{\delta^i}{A_{scale_i}}\right) \left[A_i + B_i \ln\left(\max\left(1, \left|\frac{\delta^i}{D_i}\right|\right)\right) + E_i g\left(\frac{\delta^i}{F_i}\right) \right] + C_i \delta^i + H_{scale_i} h\left(\frac{\delta^i}{F_i}\right) \quad (21)$$

ここで、 i は並進自由度：1、2、3

$$M_i(\theta^i) = f\left(\frac{\theta^i}{A_{scale_i}}\right) \left[A_i + B_i \ln\left(\max\left(1, \left|\frac{\theta^i}{D_i}\right|\right)\right) + E_i g\left(\frac{\theta^i}{F_i}\right) \right] + C_i \theta^i + H_{scale_i} h\left(\frac{\theta^i}{F_i}\right) \quad (22)$$

ここで、 i は回転自由度：4、5、6

力とモーメントの式内の変数は以下を表します：

$f\left(\frac{\delta^i}{A_{scale_i}}\right)$ スプリングの力 vs fct_ID の変位関数入力 $1i$

$f\left(\frac{\theta^i}{A_{scale_i}}\right)$ スプリングの力 vs fct_ID_{1i} の回転関数入力

A_i, B_i, D_i, E_i and F_i スケーリング係数

$\ln\left(\max\left(1, \left|\frac{\delta^i}{D_i}\right|\right)\right)$ 速度の増大に伴いスプリング剛性をスケーリングする対数関数

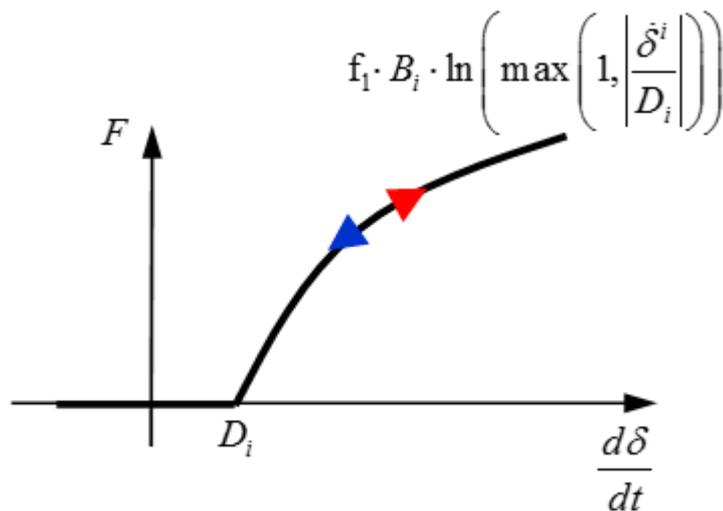


図 28: パラメータ入力

$g\left(\frac{\delta^i}{F_i}\right)$ fct_ID の線形入力の関数として剛性をスケーリング $2i$

$g\left(\frac{\dot{\theta}^i}{F_i}\right)$ fct_ID の回転速度入力の関数として剛性をスケーリング $2i$

この入力は、スプリング剛性の非線形ひずみ速度効果をモデル化するために使用できます。

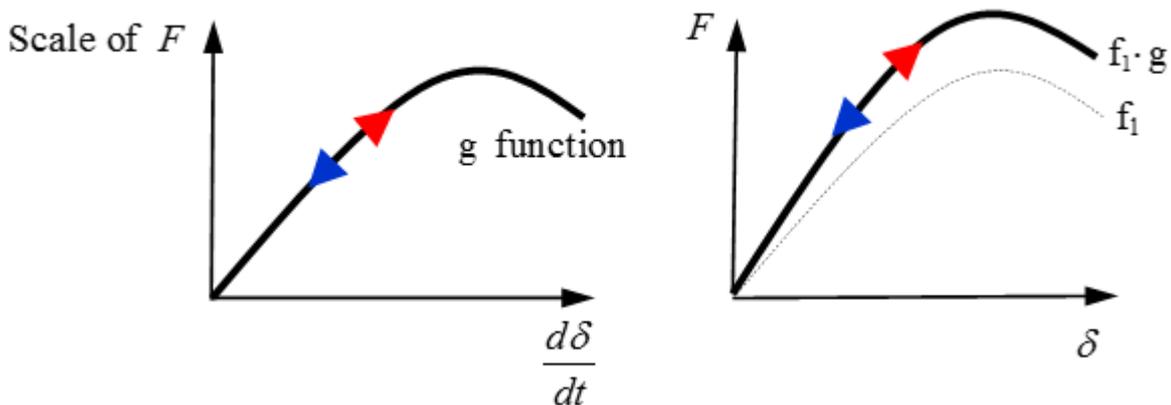


図 29: g関数入力

C_i 速度の関数としてスプリング剛性を増大させるために使用される線形減衰係数

$h\left(\frac{\dot{\delta}^i}{F_i}\right)$ または $h\left(\frac{\dot{\theta}^i}{F_i}\right)$ fct_ID としての線形減衰関数 $_{4i}$

速度の関数としての線形または非線形減衰は、線形減衰係数またはユーザー定義の関数のいずれかを用いてスプリングの力に付与することも可能です。

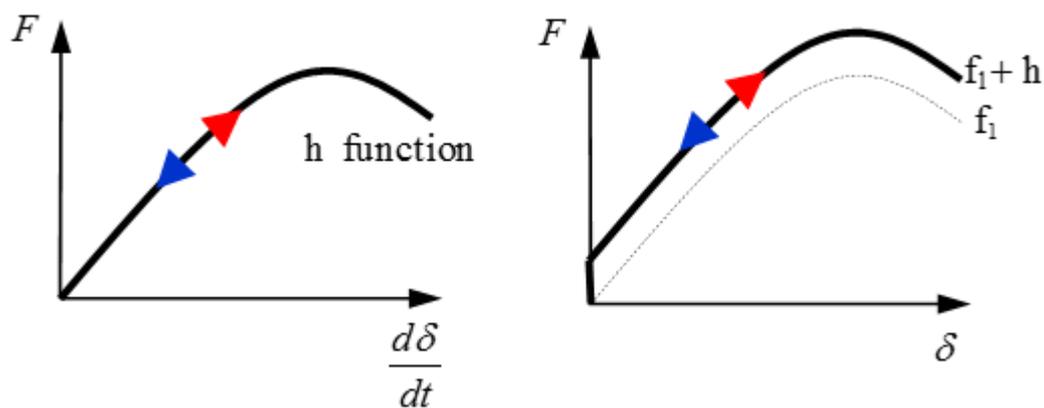


図 30: h関数入力

関数gとhは共に、スプリングの減衰挙動を表します。ただし、g関数はスプリング剛性関数fをスケーリングしますが、h関数は、スプリング剛性関数fに付与します。

時間ステップ

スプリングの時間ステップ:

$$\Delta t = \sqrt{\frac{M}{K}} \quad (23)$$

ダッシュポットの時間ステップ:

$$\Delta t = \frac{M}{2C} \tag{24}$$

スプリングとダッシュポットの時間ステップ:

$$\Delta t = \frac{\sqrt{C^2 + K \cdot M} - C}{K} \tag{25}$$

ここで、

- M 粒子の質量
- K 線形剛性または $\max\left[\frac{dF}{d\delta}\right]$
- C 線形減衰または $\max\left[\frac{\partial g\left(\frac{d\delta}{dt}\right)}{\partial\left(\frac{d\delta}{dt}\right)}\right]$ (非線形減衰の場合)

非線形スプリングの場合、 K が時間ステップ計算および一定剛性に用いられます。 K がスプリングのプロパティで定義されていない場合、 fct_ID_{1i} の最大傾き ($\max\left[\frac{dF}{d\delta}\right]$) が時間ステップの計算に自動的に用いられます。挙動は、減衰剛性 C についても同じです。

スプリング破壊

プロパティTYPE1、TYPE2、TYPE 4、TYPE 8、TYPE 13、およびTYPE 25のスプリング破壊は、2つの方法で考慮することができます。

- 1方向の破壊
- 多方向性破壊

これは、オプション $I_{fail}FAIL$ によって制御されます。プロパティに $I_{fail}FAIL$ フラグが設定されていない / 存在しない場合、スプリングに対してデフォルトの1方向の破壊が考慮されます。たとえば、TYPE4にはオプション $I_{fail}FAIL$ がないため、1方向の破壊が使用されます。

破壊モデルでは、変位破壊、力破壊、または内部エネルギー破壊を考慮することができます。これは、オプション I_{fail2} によって制御されます。 $I_{fail}FAIL$ と同様に、 I_{fail2} オプションがプロパティに設定されていない / 存在しない場合、変位(または回転)破壊モデルが使用されます。

スプリングタイプ	破壊基準 (Ifail)			破壊モデル (Ifail2)			
	1方向の破壊	多方向性破壊	α^i, β^i : における多方向性破壊	変位(または回転)の基準	速度効果を考慮した変位(または回転)の基準	力(またはモーメント)の基準	内部エネルギー基準
TYPE4	✓			✓			
TYPE8	✓	✓	$\alpha^i = 1$ $\beta^i = 2$	✓		✓	✓

スプリングタイプ	破壊基準 (Ifail)			破壊モデル (Ifail2)			
	1方向の破壊	多方向性破壊	α^i, β^i : における多方向性破壊	変位(または回転)の基準	速度効果を考慮した変位(または回転)の基準	力(またはモーメント)の基準	内部エネルギー基準
TYPE12	✓			✓			
TYPE13	✓	✓	任意 α^i, β^i (デフォルト $\alpha^i = 1$ 、 $\beta^i = 2$)	✓	✓	✓	✓
TYPE25	✓	✓	任意 α^i, β^i (デフォルト $\alpha^i = 1$ 、 $\beta^i = 2$)	✓	✓	✓	✓

破壊基準

- 1方向 ($I_{fail} FAIL = 0$)

基準が1方向の場合、1つの自由度の基準が満たされるとすぐにスプリングが破壊します。

$$\left| \frac{\delta^i}{\delta_{\max}^i} \right| \geq 1 \text{ または } \left| \frac{\delta^i}{\delta_{\min}^i} \right| \geq 1, \text{ ここで } \delta_{\max}^i \text{ と } \delta_{\min}^i \text{ は、方向 } i=1, 2, 3 \text{ における破壊限界}$$

$$\left| \frac{\theta^i}{\theta_{\max}^i} \right| \geq 1 \text{ または } \left| \frac{\theta^i}{\theta_{\min}^i} \right| \geq 1, \text{ ここで } \theta_{\max}^i \text{ と } \theta_{\min}^i \text{ は、方向 } i=4, 5, 6 \text{ における破壊限界}$$

ここで、 i は任意の自由度です。そのプロパティタイプに依存します。

プロパティTYPE4の場合、並進Xに対して、 $i=1$ のみがあります。

プロパティTYPE8の場合、並進X、Y、Zおよび回転X、Y、Zに対して、 $i=1, 2, 3, 4, 5, 6$ があります。

プロパティTYPE13の場合、 $i=1, 2, 3, 4, 5, 6$ がありますが、この場合、引張 / 圧縮X、せん断XY、せん断XZ、ねじり、曲げY、曲げZに対応します。

1方向の破壊の破壊挙動の例を以下に示します：

引張のみの試験で $\delta_{\max}^1 = 0.04\text{m}$ の場合、スプリング破壊が発生し、伸びが 0.04m に達すると力はゼロになります。同じことが回転にも当てはまります。 $\theta_{\max}^4 = 0.035\text{rad}$ の場合、スプリングが破壊し、 0.035rad で力がゼロになります。

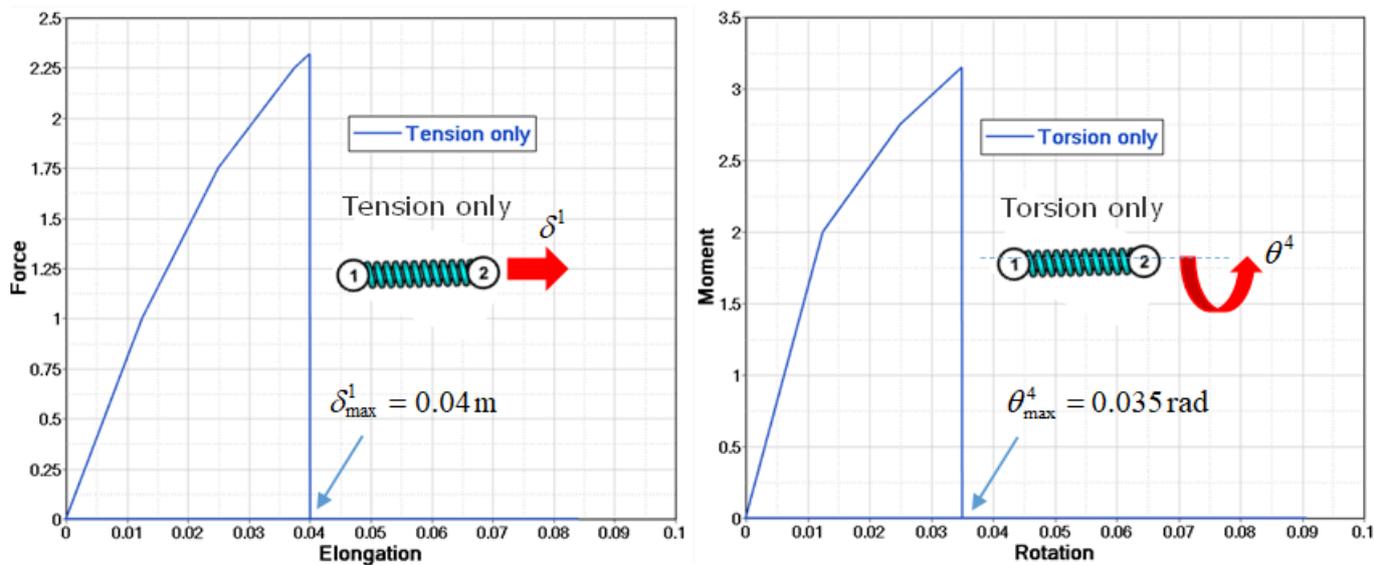


図 31:

スプリングに2つの荷重ケースが適用される場合、たとえば、引張とねじりおよび $I_{fail}/FAIL = 0$ (1方向の破壊) が使用されている場合、いずれかの破壊基準に達すると、スプリング破壊が発生します。

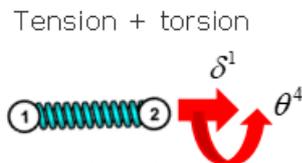


図 32:

ここでは、最初に回転基準に到達し (Time=0.58sで)、次に力とモーメントが同時にゼロになります。

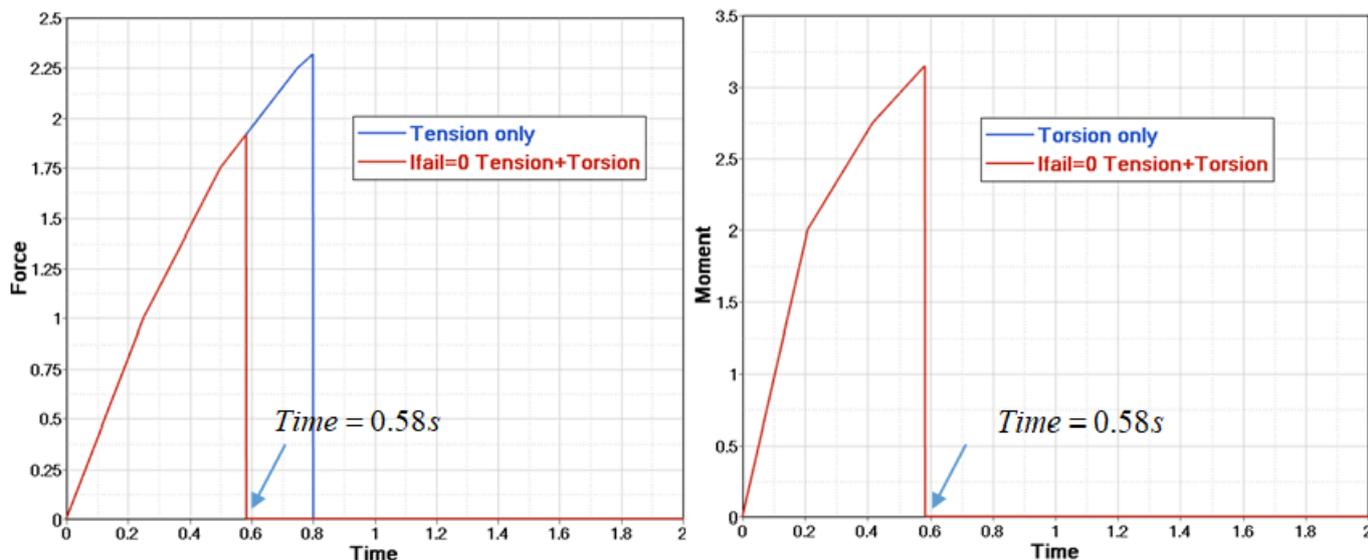


図 33:

- 多方向性 ($I_{fail} FAIL = 1$)

基準が多方向性の場合、すべての自由度が連成され、次の場合に破壊が発生します:

$$\sum_{i=1,2,3} \alpha^i \left(\frac{\delta^i}{\delta^i_{fail}} \right)^{\beta^i} + \sum_{i=4,5,6} \alpha^i \left(\frac{\theta^i}{\theta^i_{fail}} \right)^{\beta^i} \geq 1 \tag{26}$$

ここで、 δ^i_{fail} と θ^i_{fail} は破壊基準です。詳細については、[破壊基準](#)をご参照ください。

プロパティTYPE8の場合、 $\alpha^i = 1$ と $\beta^i = 2$ ([図 34](#)に青い曲線で示されている破壊基準)です。

プロパティTYPE13およびTYPE25の場合、 $\alpha^i > 0$ に対して(デフォルトは $\alpha^i = 1$)、任意の α^i , β^i を入力できます。[図 34](#) は、 β^i が異なる場合の破壊基準を示しています。

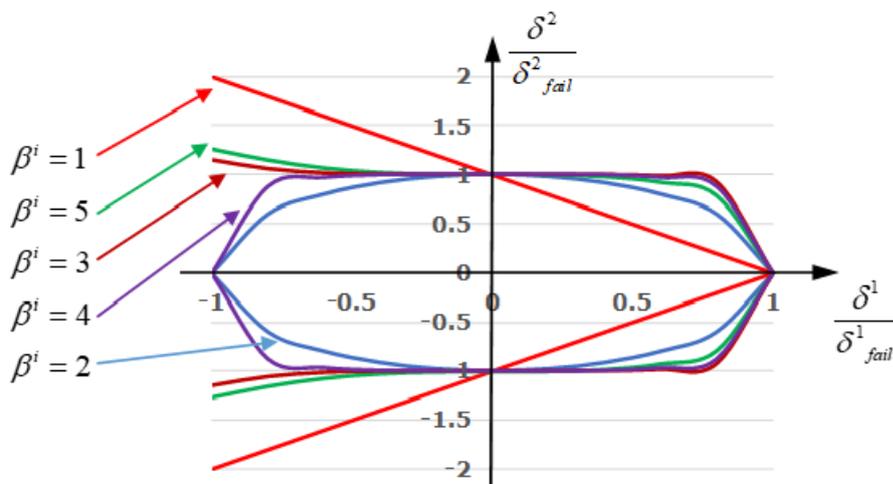


図 34:

2つの荷重ケースのテストケースでは、引張 + ねじりで $I_{fail}FAIL = 1$ になっています。

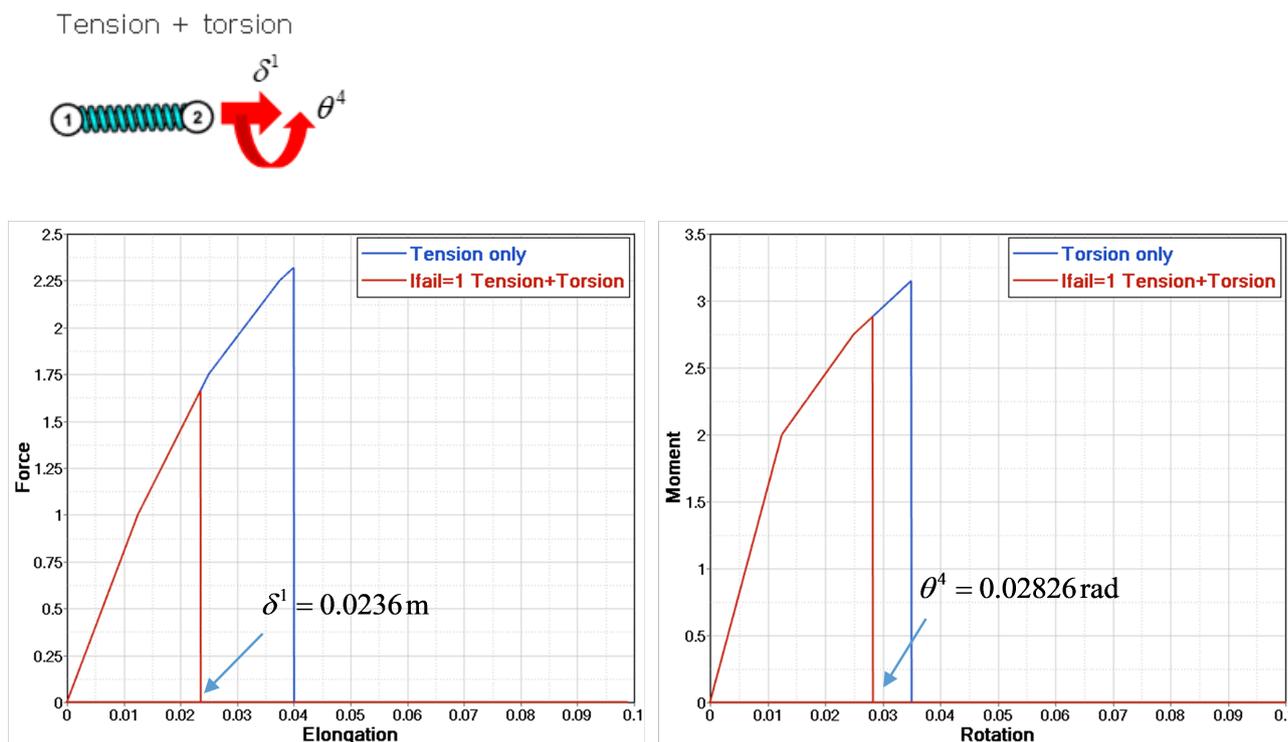


図 35:

破壊値を1方向にのみ設定された限度と比較すると、通常、定義された限度よりも小さくなります。この例の場合、引張限度は0.04mに設定され、ねじり限度は0.035radに設定されています。スプリングは、伸び $0.0236 < 0.04$ 、回転 $0.02826 < 0.035$ で破壊します。これは、引張とねじりの破壊の組み合わせが、破壊円(図 36)に到達するためです。その結果、スプリングが破壊しました(力とモーメントがゼロになります)。

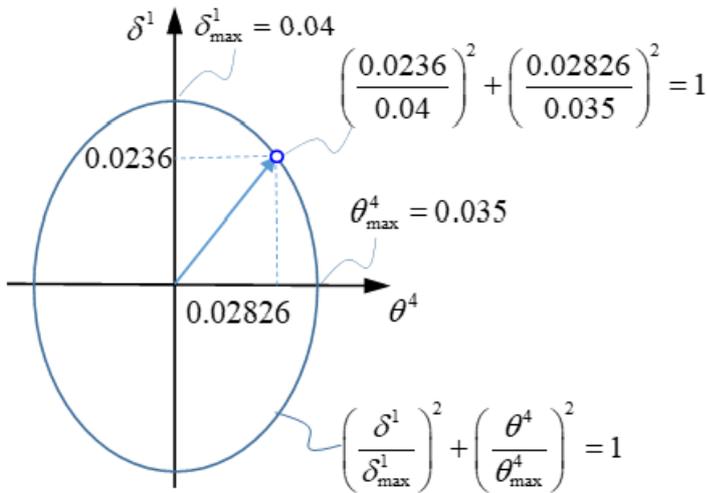


図 36:

破壊モデル

オプション I_{fail2} は、プロパティ TYPE8、TYPE13、およびTYPE25で使用できます。

- 変位(または回転)破壊基準 ($I_{fail2} = 0$)

$$\sum_{i=1,2,3} \left(\frac{\delta^i}{\delta_{fail}^i} \right)^2 + \sum_{i=4,5,6} \left(\frac{\theta^i}{\theta_{fail}^i} \right)^2 \geq 1 \tag{27}$$

ここで、

$$\delta_{fail}^i = \begin{cases} \delta_{max}^i, & if(\delta^i > 0) \\ \delta_{min}^i, & if(\delta^i \leq 0) \end{cases} \text{ および } \theta_{fail}^i = \begin{cases} \theta_{max}^i, & if(\theta^i > 0) \\ \theta_{min}^i, & if(\theta^i \leq 0) \end{cases}$$

- 速度効果を考慮した変位(または回転)の破壊基準 ($I_{fail2} = 1$)

この破壊基準により、速度に依存した破壊限界をモデル化することができます。これらは、変位、力、および内部エネルギーで利用可能です。したがって、並進 δ_{fail}^i および回転 θ_{fail}^i の破壊は、速度を考慮して次のように変更されます。

$$\sum_{i=1,2,3} \left(\frac{\delta^i}{\delta_{fail}^i} \right)^2 + \sum_{i=4,5,6} \left(\frac{\theta^i}{\theta_{fail}^i} \right)^2 \geq 1 \tag{28}$$

$$\delta_{fail}^i = \begin{cases} \delta_{max}^i + c_i \cdot \left| \frac{v_i}{v_0} \right|^{n_i}, & if(\delta^i > 0) \\ \delta_{min}^i - c_i \cdot \left| \frac{v_i}{v_0} \right|^{n_i}, & if(\delta^i \leq 0) \end{cases} \text{ および } \theta_{fail}^i = \begin{cases} \theta_{max}^i + c_i \cdot \left| \frac{\omega_i}{\omega_0} \right|^{n_i}, & if(\theta^i > 0) \\ \theta_{min}^i - c_i \cdot \left| \frac{\omega_i}{\omega_0} \right|^{n_i}, & if(\theta^i \leq 0) \end{cases}$$

パラメータ c_i は指数関数のスケールであり、パラメータ n_i は図 37 のように破壊に影響を与えます。

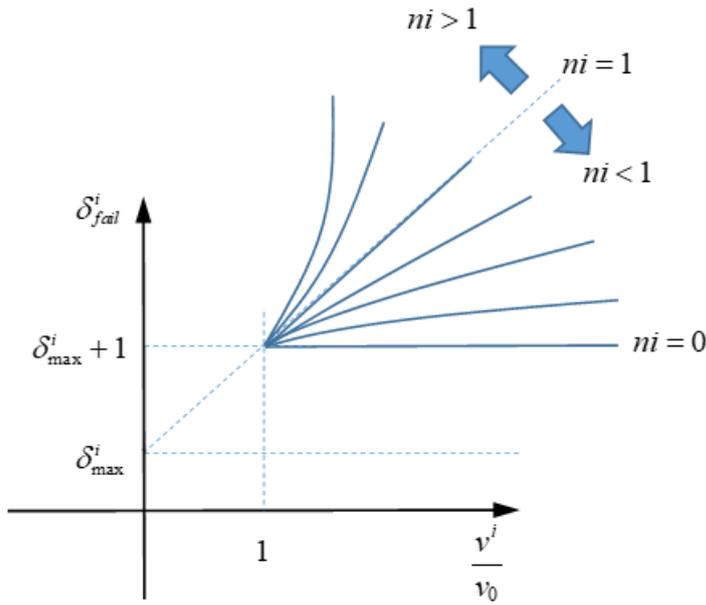


図 37:

上記の式は、変位 / 回転の基準に有効であり、力 / モーメントおよびエネルギーの基準でもあります。

- 力(またはモーメント)基準 ($I_{fail2} = 2$) および内部エネルギー基準 ($I_{fail2} = 3$)

並進 δ^i_{fail} および回転 θ^i_{fail} の破壊は次のようになります:

$$\sum_{i=1,2,3} \left(\frac{\delta^i}{\delta^i_{fail}} \right)^2 + \sum_{i=4,5,6} \left(\frac{\theta^i}{\theta^i_{fail}} \right)^2 \geq 1 \tag{29}$$

$$\delta^i_{fail} = \begin{cases} \delta^i_{max} + c_i \cdot \left| \frac{v^i}{v_0} \right|^{n_i}, & if(\delta^i > 0) \\ \delta^i_{min} - c_i \cdot \left| \frac{v^i}{v_0} \right|^{n_i}, & if(\delta^i \leq 0) \end{cases} \text{ および } \theta^i_{fail} = \begin{cases} \theta^i_{max} + c_i \cdot \left| \frac{\omega^i}{\omega_0} \right|^{n_i}, & if(\theta^i > 0) \\ \theta^i_{min} - c_i \cdot \left| \frac{\omega^i}{\omega_0} \right|^{n_i}, & if(\theta^i \leq 0) \end{cases}$$

上記の式は、変位 / 回転、力 / モーメント、およびエネルギーに有効です。

ここで、 δ^i_{max} , δ^i_{min} (θ^i_{max} , θ^i_{min}) は変位 (回転角) 基準ではなく、 $I_{fail2} = 2$ の場合は最大または最小の力 (モーメント)、 $I_{fail2} = 3$ の場合は内部エネルギーです。

速度の影響も考慮され、相対速度係数 c_i は力 / モーメント ($I_{fail2} = 2$) または内部エネルギー ($I_{fail2} = 3$) に関連しています。

スプリングの硬化

スプリングの等方、移動または分離硬化オプションは、硬化フラグ H によって定義することができます。

これらの例は、減衰なしのスプリング剛性のみを扱っています。

線形弾性スプリング、H=0

線形スプリングは、 K_i and $fct_ID_{1i} = fct_ID_{4i} = 0$ として線形剛性のみを入力することによってモデル化できます。線形剛性の場合、Hは常に0です。

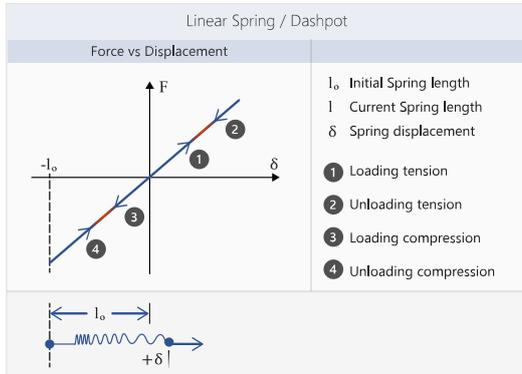


図 38: 線形弾性スプリング

ここで、 $H=0$

非線形弾性スプリング、H=0

非線形弾性スプリングは、力vs変位曲線を定義することによってモデル化できます。ここで、図 39内の f_1 は、 fct_ID_{1i} で定義されています。モデルは弾性なので、載荷と除荷は同じ経路に従います。

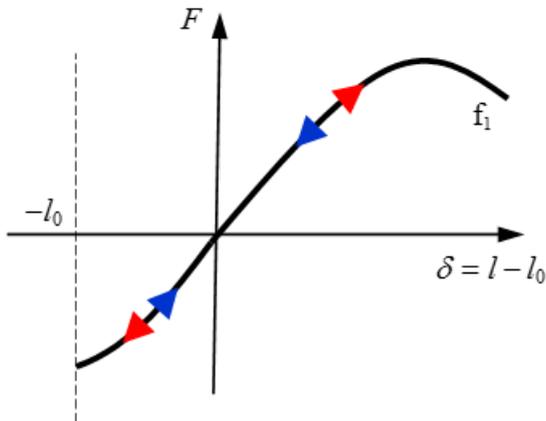


図 39: 非線形弾性スプリング

ここで、 $H=0$

等方硬化を伴う非線形弾塑性スプリング、H=1

図 40 は、等方硬化を伴う非線形弾塑性スプリングの挙動を示しています。ここで、 f_1 は fct_ID_{1i} で定義され、除荷剛性 K_{ui} は K_i を用いて入力されます。

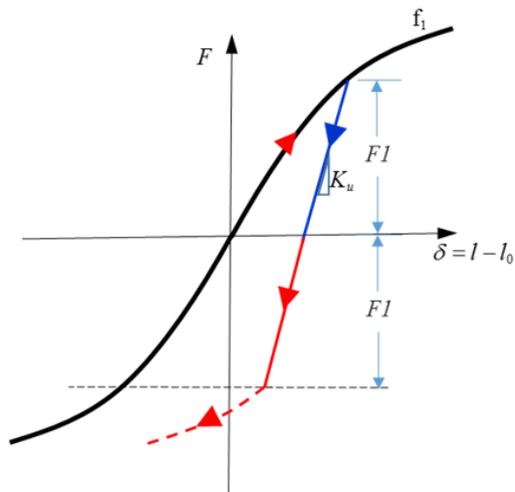


図 40: 等方硬化
 ここで、 $H=1$

等方硬化 $H=1$ を表すために、図 41は引張で荷重され、線形除荷剛性 K_u を使って除荷されているスプリングを示しています。除荷剛性は、圧縮での荷重力が引張での最大荷重力と合致するまで、圧縮荷重で使用され続けます。このポイントから、任意の追加圧縮荷重は入力荷重関数を使用します。

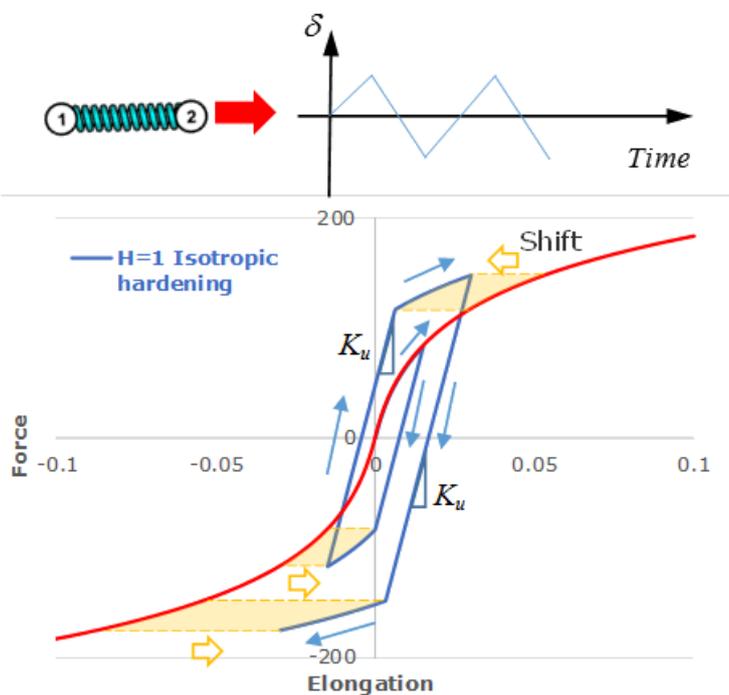


図 41: スプリングに適用される周期荷重
 ここで、 $H=1$

分離硬化を伴う非線形弾塑性スプリング、 $H=2$

図 42の力vs変位曲線 f_1 は $fact_ID_{1i}$ で定義され、除荷剛性 K_u は K_i を使って入力されます。分離硬化 $H=2$ が使用される際、引張および圧縮の挙動は分離されます。したがって、除荷が力0に達すると、0変位まで剛性はなしとなり、圧縮荷重は力-変位曲線に従います。

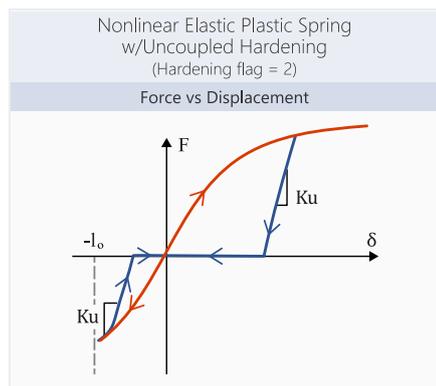


図 42: 等方硬化

ここで、 $H=2$

移動硬化を伴う非線形弾塑性スプリング、 $H=4$

$H=4$ が使用される際、荷重関数 fct_ID_{1i} および除荷関数 fct_ID_{3i} は必須で、図 43で f_1 および f_3 として示されます。荷重曲線は、すべての横軸値に対して正でなければなりません。この場合の除荷曲線は、すべての横軸値に対して負になります。これらの曲線は、降伏力の上限と下限を、現在のスプリングの長さ変化またはひずみの関数として表します。力は関数 f_1 と f_3 の間の K に従い、 K_i として入力されます。

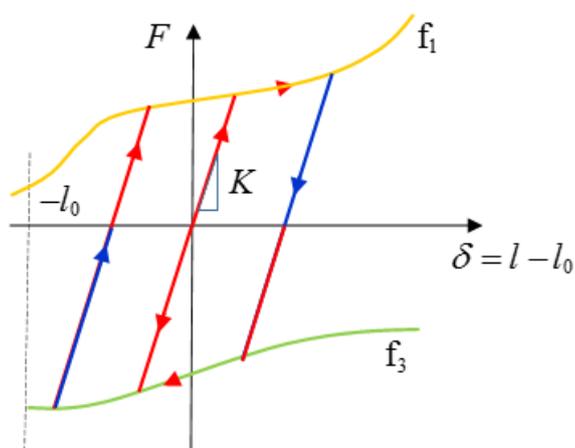


図 43: 移動硬化

ここで、 $H=4$

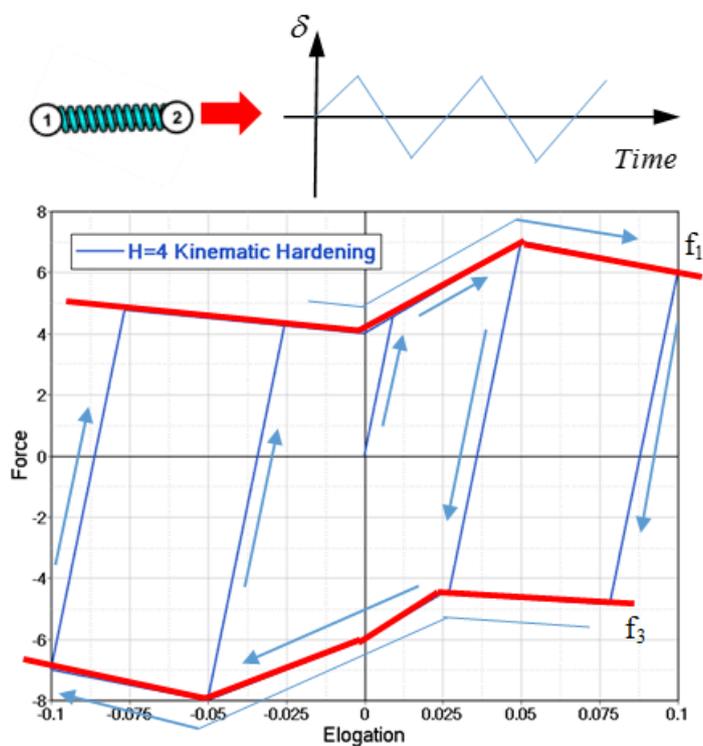


図 44: スプリングに適用される周期載荷
 ここで、移動硬化H=4

最小および最大降伏曲線 (f_1 および f_3) が同じ形状の場合、硬化は次のように移動硬化として考慮されます

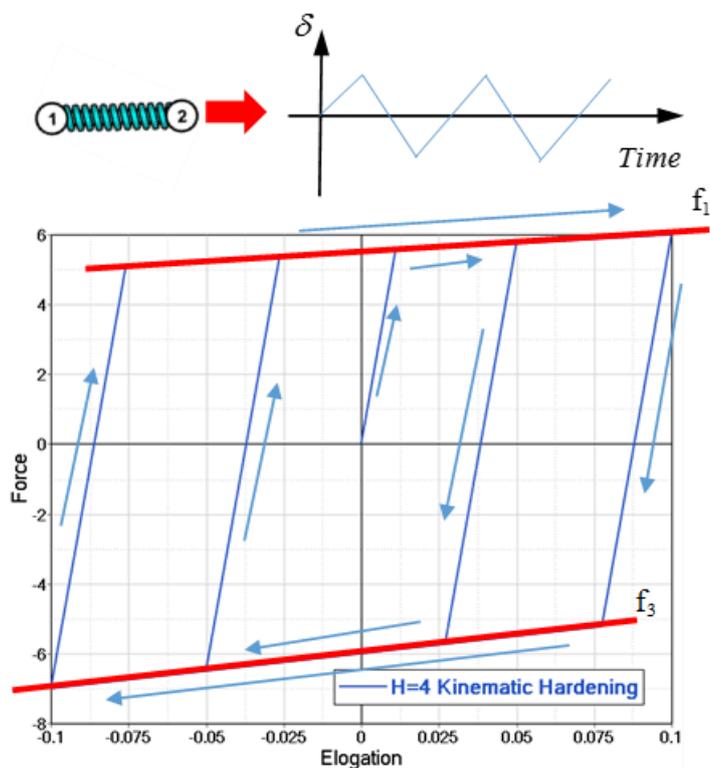


図 45: H=4、最小および最大降伏曲線

同じ形状の入力 (f_1 および f_3) 入力

非線形除荷を伴う非線形弾塑性スプリング、 $H=5$

$H=5$ である際、圧縮と引張における非線形除荷を伴う分離硬化がモデル化されます。

関数 f_3 は、変位に関連付けられた残差変位 δ_{resid} と定義します。ここで、除荷は δ_{peak} で始まります。除荷は次のように定義されます：

$$F(K, f_3) = \alpha(\delta - \delta_{resid})^n \quad (30)$$

ここで、 $\delta_{resid} = f_3(\delta_{peak})$

ここで、 α と n は K と $f_3(\delta_{peak})$ を使用して計算されます。図 46 の载荷関数 f_1 は fct_ID_{1i} で定義され、残差変形関数 f_3 は fct_ID_{3i} として入力します。

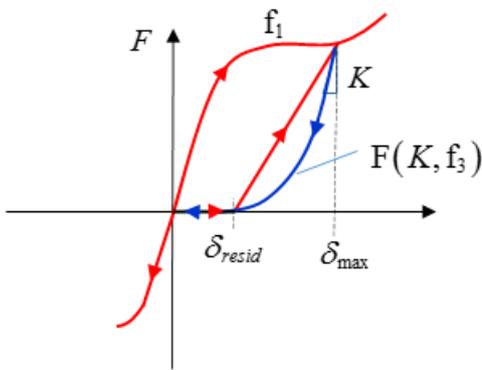


図 46: 非線形除荷

ここで、 $H=5$

図 47 では、線形曲線は関数 f_3 内で δ_{resid} および δ_{peak} について定義されます。 δ_{peak} は、 δ_{peak} の 0.5 倍です。周期载荷では、最初の除荷は $\delta_{peak1} = 0.05$ で、続いて $\delta_{resid} = 0.5 \times 0.05 = 0.025$ で始まります。2 番目の除荷は $\delta_{peak2} = 0.1$ で、続いて $\delta_{resid} = 0.5 \times 0.1 = 0.05$ で始まります。

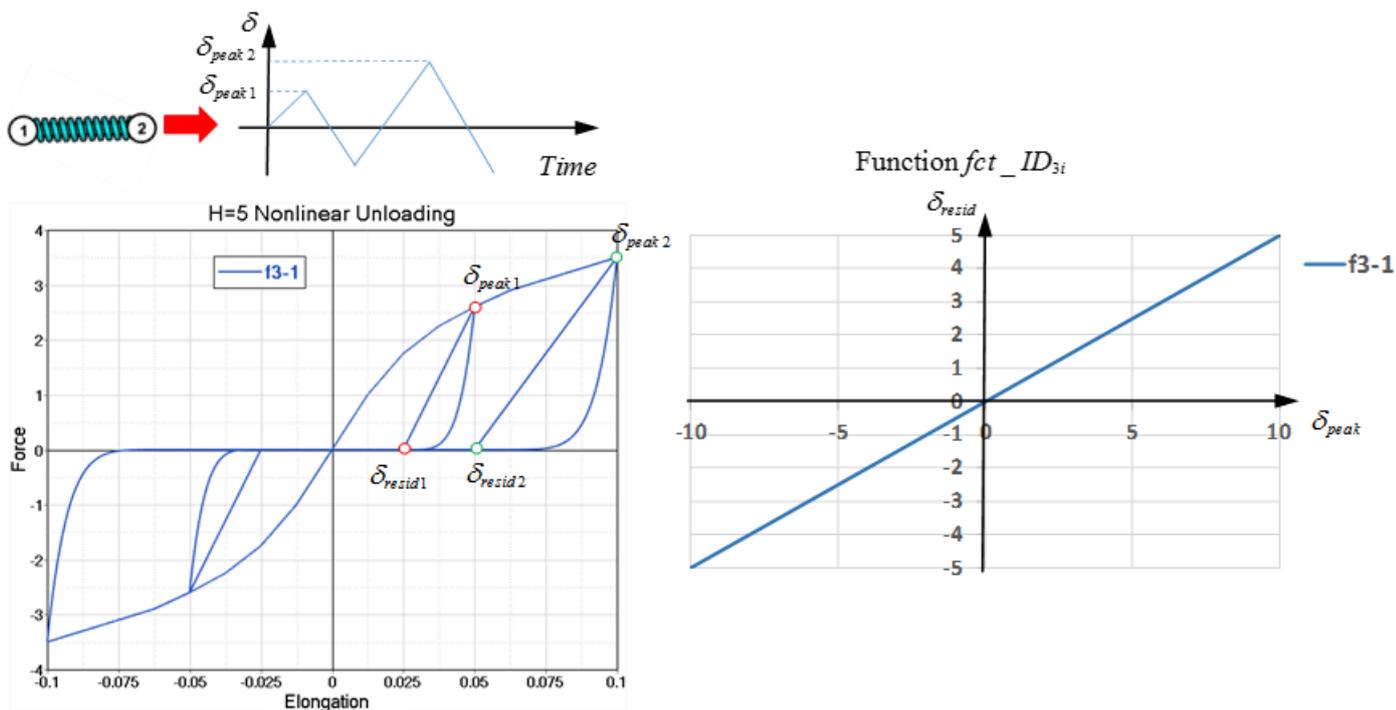


図 47: 線形残差vs最大変位曲線
 ここで、 $H=5$

図 48 は、線形残差vs最大変位曲線の傾きが大きくなるとスプリングの挙動がどのように変化するかを示しています。

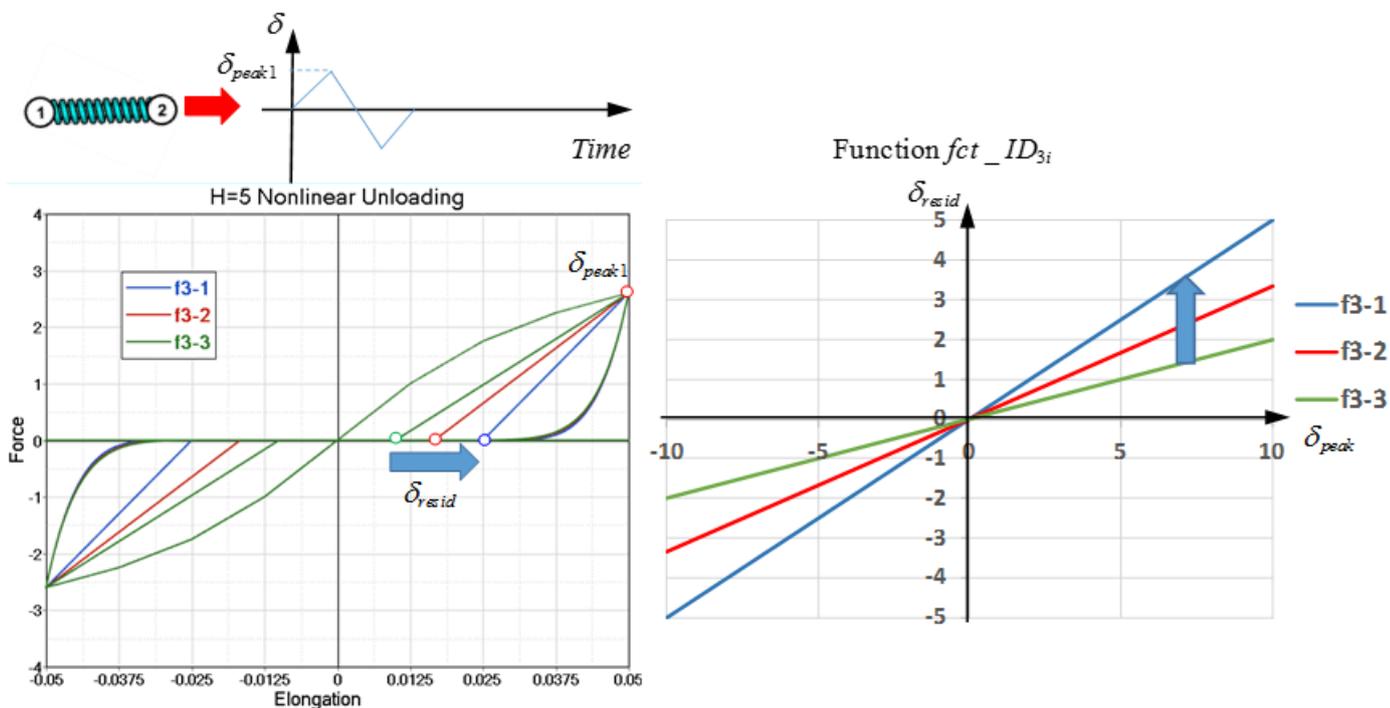


図 48: 異なる線形残差vs最大変位曲線
 ここで、 $H=5$

図 47と図 48との比較は、関数 f_3 が残差変位 δ_{resid} および除荷曲線の形状にのみ影響することを示しています。除荷曲線の形状は、剛性 K および δ_{peak} (除荷開始変位)によってコントロールされます。

同じ剛性 K および同じ δ_{peak} が使用されると、除荷曲線は同じ形状になります。

同じ剛性 K と異なる δ_{peak} が使用されると、除荷曲線は異なる形状になります。

異なる剛性 K と同じ δ_{peak} が使用されると、除荷曲線は異なる形状になります(図 49に示すとおり)。

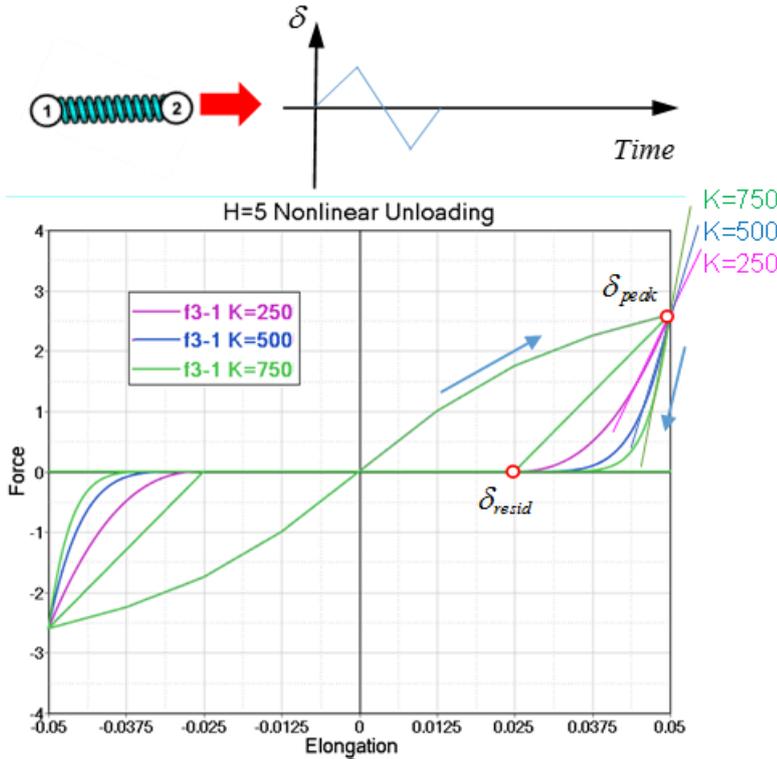


図 49: 異なる K の値
ここで、 $H=5$

非線形弾塑性スプリング等方硬化と非線形除荷、 $H=6$

$H=1$ と $H=6$ は共に、等方硬化を表しています。 $H=6$ では、関数 f_3 の非線形除荷 $H=1$ は線形除荷に K_{li} を使用します。引張でスプリングが載荷され、続いて除荷すると、定義された除荷曲線に従います。除荷曲線は、圧縮での載荷力が引張での最大載荷力と合致するまで、圧縮載荷で使用され続けます。このポイントから、任意の追加圧縮載荷は入力載荷関数を使用します。 f_1 の載荷曲線は fct_ID_{1i} を、 f_3 の除荷曲線は fct_ID_{3j} を使って定義されます。

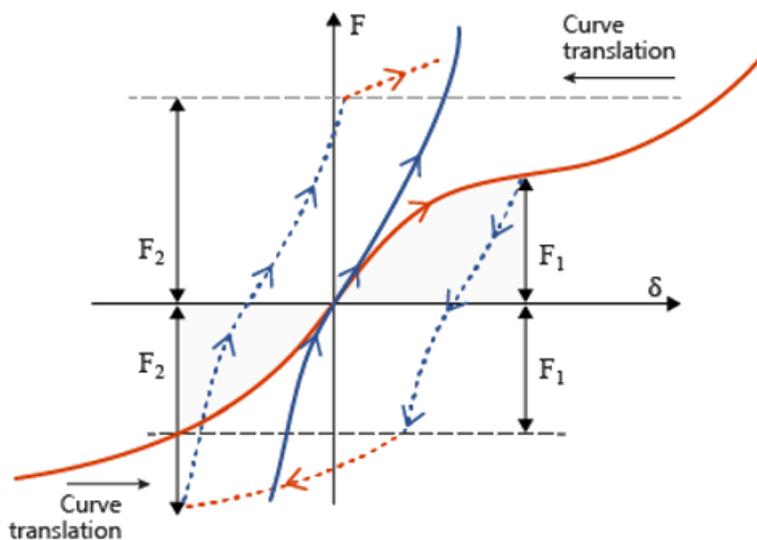


図 50: 等方硬化と非線形除荷
ここで、 $H=6$

非線形弾塑性スプリング弾性ヒステリシス、 $H=7$

$H=7$ では、スプリング除荷は最初は入力 K の値を用いて除荷曲線 f_3 に達するまで線形です。追加の除荷は、 f_3 に従います。再載荷が起こると、剛性 K は曲線 f_1 に達するまで使用され、その後、追従されます。曲線 f_3 は、定義された横軸値における曲線 f_1 より小さい縦軸値を有さなければなりません。 f_1 の載荷曲線は fct_ID_{1i} を、 f_3 の除荷曲線は fct_ID_{3i} を使って定義されます。

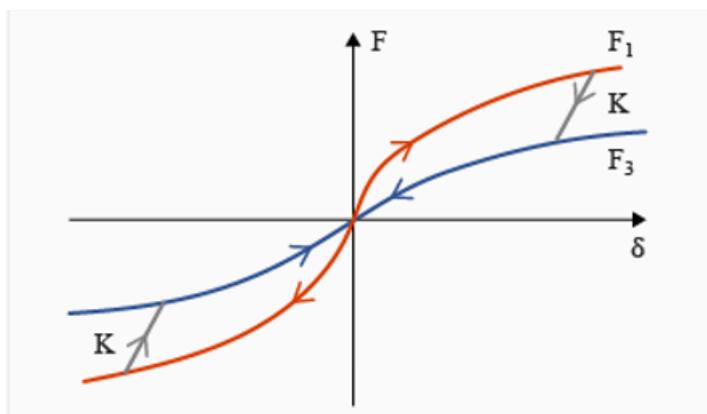


図 51: 非線形弾塑性スプリング弾性ヒステリシス
ここで、 $H=7$

$H=7$ のスプリングは、ヒステリシス挙動を描写するために使用されます。図 52 は周期載荷での $H=0$ と $H=7$ の差を示しています。 $H=0$ (青い曲線)では、これは非線形弾性ですが、 $H=7$ (赤い曲線)では、ヒステリシスループであるため、より大きなエネルギー(1つ目のループ内の黄色い領域)が吸収されます。

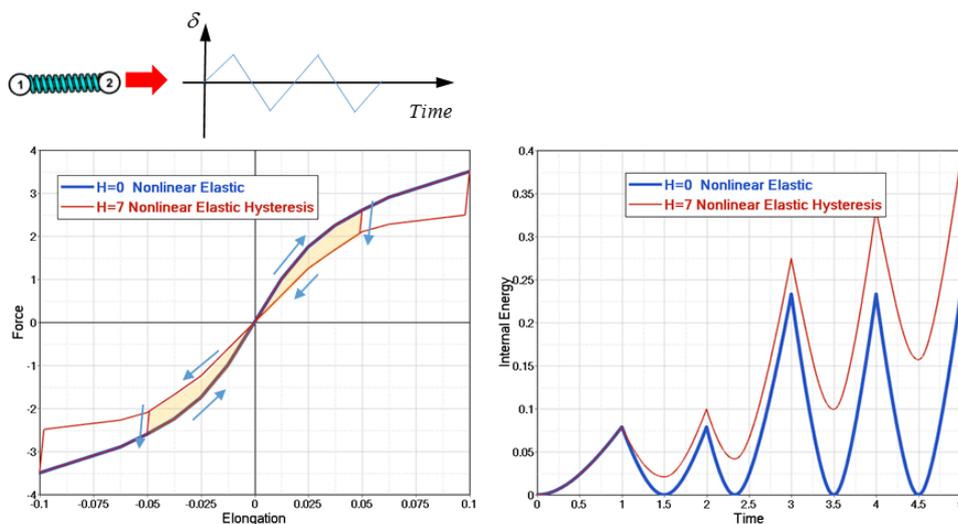


図 52: 比較: 非線形弾性とヒステリシスH=7
および非線形弾性H=0

非線形弾性全長関数、H=8

弾性全長スプリングH=8は、/PROP/TYPE4でのみ使用できます。スプリングの長さが増える他の硬化オプションとは異なり、このスプリングは、スプリング剛性を定義する際に全スプリング長を使用します。圧縮では剛性は発生しません。力vs全スプリング長を定義するための入力 fct_ID_{1i}

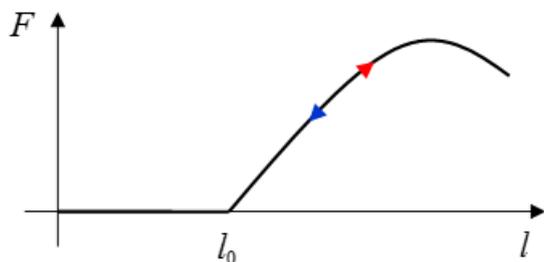


図 53: 非線形弾性全長関数
ここで、H=8

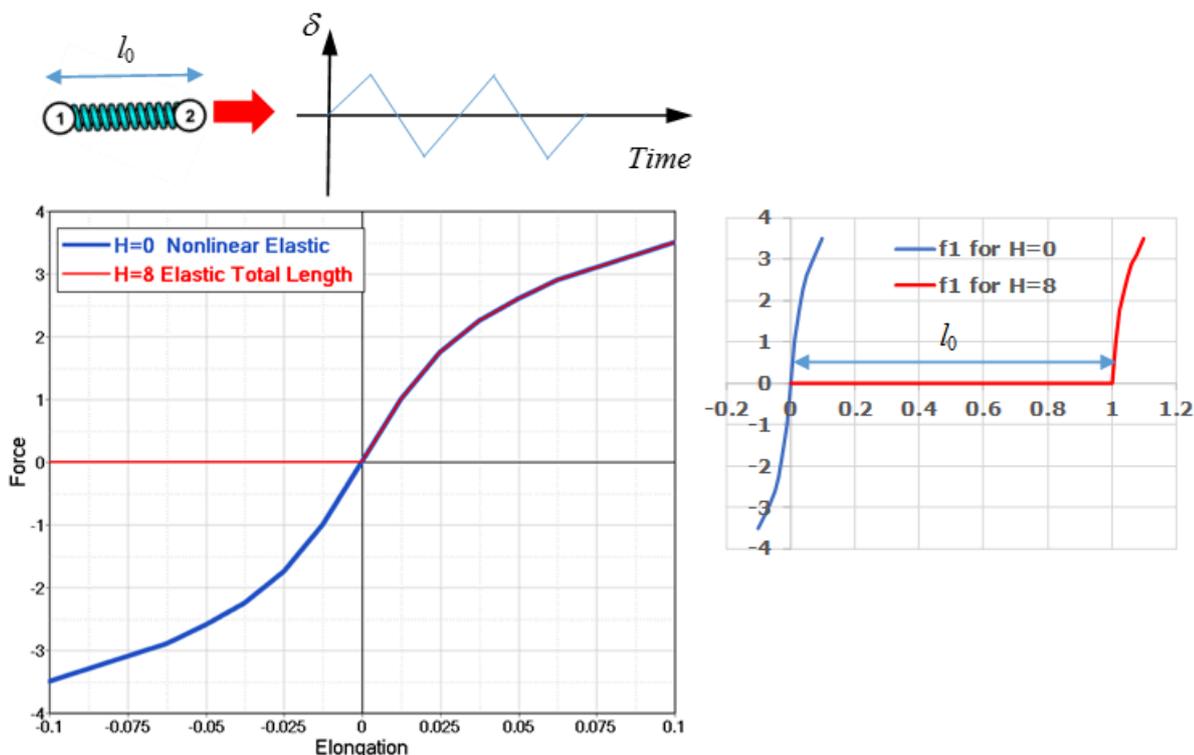


図 54: 比較; H=0
およびH=8(周期载荷を適用)

ダッシュポット

ダッシュポット(ダンパー)は、スプリング剛性を定義することなしにモデル化できます。したがって、Equation 1の第1項を削除すると、力は一定減衰係数 C_i の関数のみ、または fct_ID_4 として非線形力の速度減衰関数 h となります。

$$F_i(\delta^i) = C_i \delta^i + Hscale_i h\left(\frac{\delta^i}{F_i}\right) \quad (31)$$



図 55:

関数を使った減衰

g 関数は力 $f_1 \cdot g$ をスケールし、一方、 h 関数は力 $f_1 + h$ を付与します。図 56 は、これら2つの手法を比較しています。

周期荷重が非線形弾塑性スプリングに付与されており(H=1)、2つのモデルで1つは力のスケールに g 関数を、もう1つは力の付与に h 関数を使用しています。

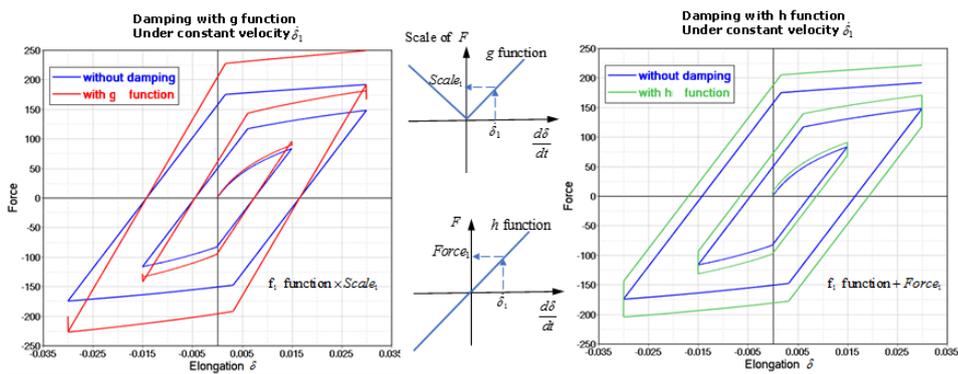


図 56:

 注: 関数hは速度と同じ符号を有していなければなりません, 関数gは常に正でなければなりません。これは、力の変位曲線 f_1 への乗数であるためです。

一貫性のない剛性

スプリング特性を、ユーザー定義の“力 - 変位” 曲線に基づく剛性と共に生成した場合、非常に高い圧縮を取り扱うために一般的に曲線の最後は高い勾配となります。このような場合、Radioss Starterで次のようなワーニングが表示されま

```
WARNING ID: 506
** WARNING IN SPRING PROPERTY
** WARNING IN SPRING PROPERTY SET ID=XXX
STIFFNESS VALUE 100 IS NOT CONSISTENT WITH THE MAXIMUM SLOPE (4550)
OF THE YIELD FUNCTION ID=X
THE STIFFNESS VALUE IS CHANGED TO 1000
```

このワーニングは入力の曲線の勾配（つまり剛性）が初期剛性と一貫していないという事実から来ています。曲線の最大勾配（つまり最大剛性）が初期剛性よりも大きい場合、最大勾配のゾーンでの除荷が誤ったものになります（Figure 1）。正しい挙動を得るため、Radioss Starterは初期剛性を最大勾配によって修正します。

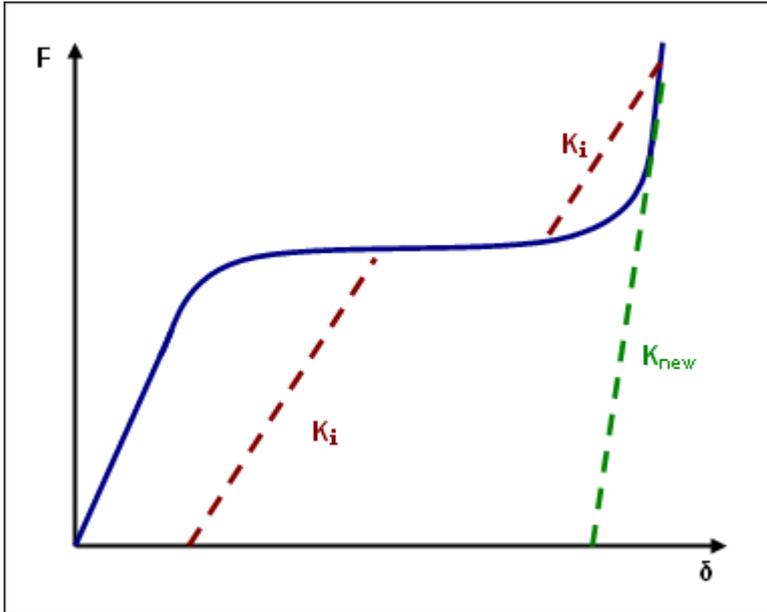


図 57: 一貫していない剛性

スプリングの座標系

スプリングの局所座標系

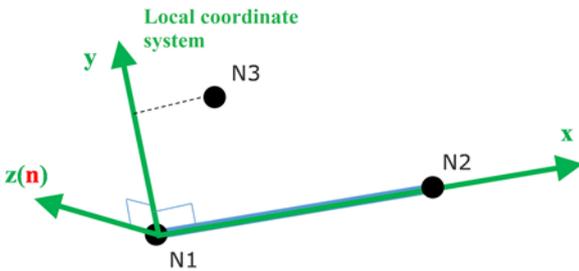


図 58:

スプリング要素は、局所座標系が定義された /SPRING を使用して定義します (図 58)。

- 局所x方向: 節点N1から節点N2に向かう方向
- 局所xy平面: N1、N2、N3によって定義される平面(1自由度のスプリングの場合、N3は省略可能であり、3自由度のスプリングでN3が未定義の場合は、適切な全体軸が使用されます)。
- 局所z方向: N1を始点とし、xy平面に対して垂直。
- 局所y方向: $y = z \wedge x$ (z軸とx軸の外積)。

スプリングのタイプは、/PARTを通じてそのスプリングに割り当てられたプロパティによって決まります。

力計算のためのスプリングの座標系

- プロパティ /PROP /TYPE4 (SPRING)、/PROP /TYPE32 (SPR_PRE)、/PROP /TYPE35 (STITCH):
これらのスプリングはすべて1自由度を有しており、力はスプリングの局所x方向で計算されます。
- プロパティ /PROP /TYPE8 (SPR_GENE):

力とモーメントは、全体座標系から計算されるか、ユーザー指定のスキュー内で計算されます。このスプリングでは、6自由度が計算されます。

- スキューが定義されていない場合、全体座標系が使用されます。

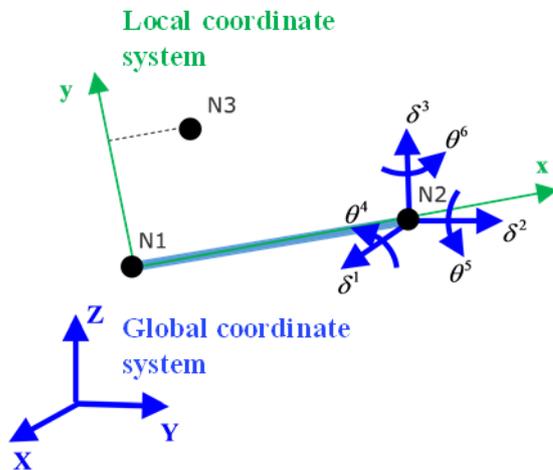


図 59: プロパティTYPE8で使用される全体座標系

- スキューが定義されている場合、自由度ではスキューが次のように使用されます:

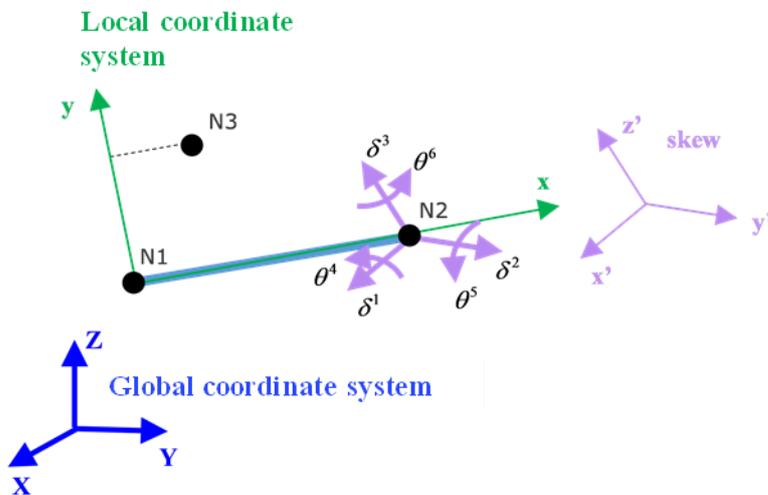


図 60: プロパティTYPE8で使用されるスキュー

- プロパティ/PROP/TYP13 (SPR_BEAM)、/PROP/TYP25 (SPR_AXI)、/PROP/TYP44 (SPR_CRUS):
これらのプロパティでは、元の局所座標系、スキューで更新された局所座標系、または全体座標系を使用できます。局所x方向は、常に節点N1からN2への方向です。入力に応じて、z方向は、節点N3、スキュー、または全体座標系によって決定できます。最後に、y方向が更新され、平面xzに対して垂直になります。
 - 局所x方向: 節点N1から節点N2に向かう方向です。
 - 局所z方向:
 - N3が定義されている場合、z方向は、N1、N2、N3によって定義される平面に対して垂直になります。これら3つの節点は一直線に並んではいけません。

- ・ N3は定義されていないが、スキューが定義されている場合、 $z = x \wedge y'$ (y' はスキューからの方向)となります。
- ・ N3とスキューが定義されていない場合、 $z = x \wedge Y$ (Y は全体座標系からの方向)となります。
- y 方向: y 方向は、平面 xz に垂直になるように計算され、 $y = x \wedge z$ です。

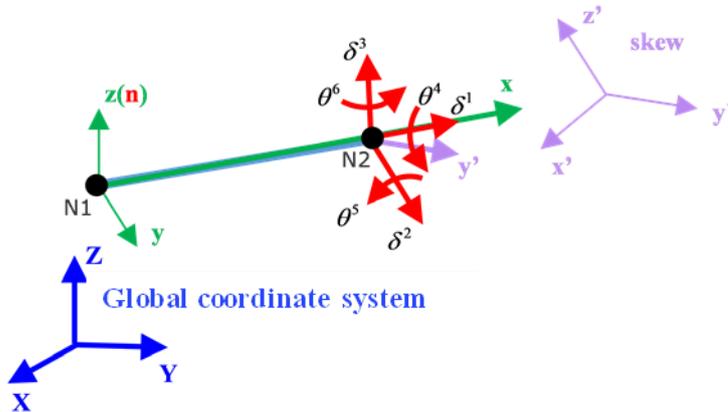


図 61: スキュー座標系の使用

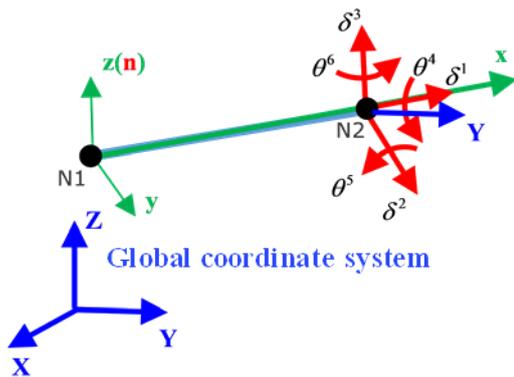


図 62: 全体座標系の使用

- プロパティ/PROP/TYP45 (KJOINT2):

各ジョイントタイプについて、節点N1と節点N2を使用してジョイント自体が定義されます。節点N1と節点N2は剛体以外にも結合できるようになりました。節点N1とN2は一致していなくてもかまいませんが、ジョイントのよりよい挙動のためには、初期状態で節点位置は一致している事を強く推奨します。オプションの節点である節点N3と節点N4は、ジョイントの両側の局所座標系を定義するために使用されます。最初は、これらの座標系は一致しています。ジョイントの挙動は、これらの局所座標系の相対的な動き / 回転によって決定されます。

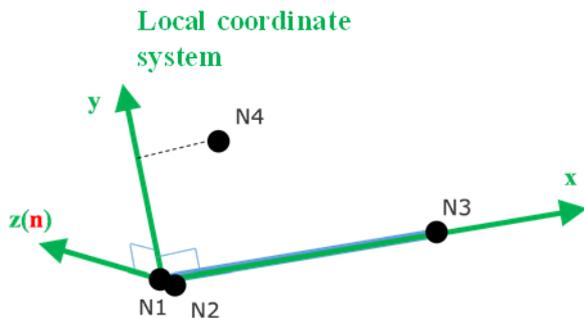


図 63:

球ジョイントの節点N1とN2は、できれば一致させてください。剛体ジョイントは、節点N1とN2によって表現できます。全体座標系を使用して、局所座標系の初期方向が定義されます。

タイプ番号	ジョイントタイプ	dx	dy	dz	θ_X	θ_Y	θ_Z
1	球	x	x	x	0	0	0
8	剛性	x	x	x	x	x	x

x: 固定自由度を示します。

0: フリー自由度(ユーザー定義)を示します。

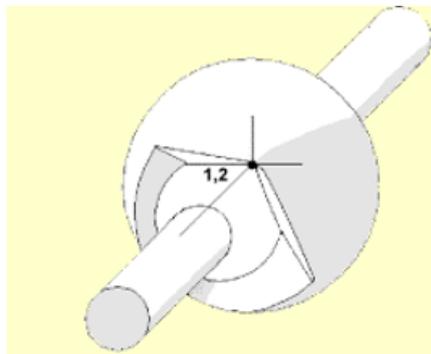


図 64: 球ジョイント

回転、円筒、並進ジョイントでは、節点N3を使用して、ジョイントの局所座標系の第1軸が定義されます。N3が指定されていない場合、節点N1とN2を結ぶ線を使用してジョイントの軸が定義されます。この場合、節点N1とN2は同じ位置にあってはいけません。

タイプ番号	ジョイントタイプ	dx	dy	dz	θ_X	θ_Y	θ_Z
2	回転	x	x	x	0	x	x
6	並進	0	x	x	x	x	x

タイプ番号	ジョイントタイプ	dx	dy	dz	θ_X	θ_Y	θ_Z
3	円筒	0	x	x	0	x	x

x: 固定自由度を示します。

0: フリー自由度(ユーザー定義)を示します。

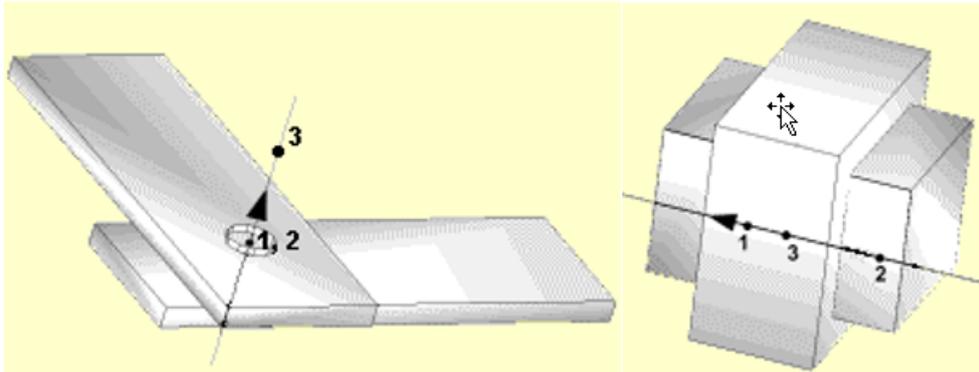


図 65: 球ジョイントと並進ジョイント

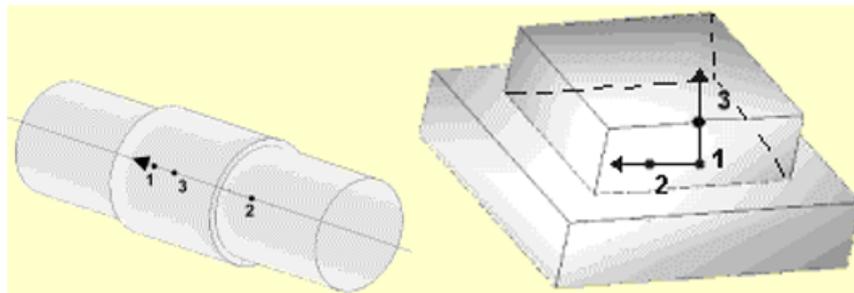


図 66: 円筒ジョイントと平面ジョイント

ユニバーサル、フリー、平面ジョイントでは、節点N3とN4を使用して、ジョイントの局所座標系の第1軸と第2軸が定義されます。

タイプ番号	ジョイントタイプ	dx	dy	dz	θ_X	θ_Y	θ_Z
4	平面	x	0	0	0	x	x
5	ユニバーサル (開発ソースのみ)	x	x	x	x	0	0
9	フリー	0	0	0	0	0	0

x: 固定自由度を示します。

0: フリー自由度(ユーザー定義)を示します。

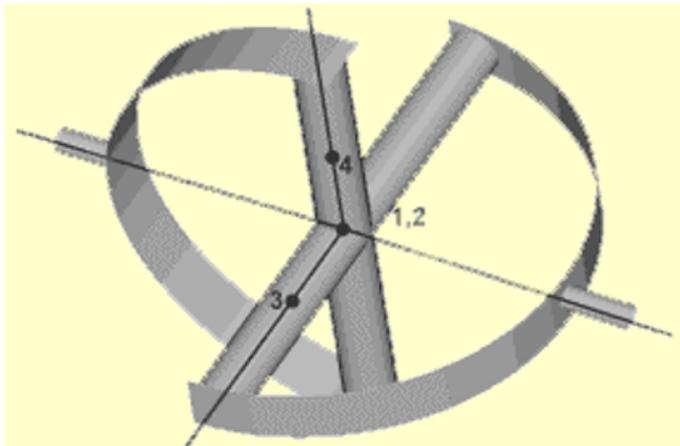


図 67: ユニバーサルジョイント

ジョイントプロパティが等方性でない(ブロックされていないそれぞれの自由度において異なる剛性、摩擦、または減衰)場合、局所座標系の完全な定義が必要になります。この場合、局所座標系の第1軸は節点N3、局所座標系の第2軸は節点N4によって定義され、第3軸は自動的に計算されます。

スキュー定義に応じて、/PROP/TYPE45 (KJOINT2)によって力とモーメントが計算されます。

$Skew_ID_1 = 0; Skew_ID_2 = 0$ スプリングの局所座標系を使用します。

$Skew_ID_1 \neq 0; Skew_ID_2 = 0$ Skew_ID1を使用します: $Skew_ID_1$

$Skew_ID_1 \neq 0; Skew_ID_2 \neq 0$ 平均局所座標系を使用します。

$Skew_ID_1$ と $Skew_ID_2$ のx軸は平行である必要があります。

$Skew_ID_1 = 0; Skew_ID_2 \neq 0$ まず、 $Skew_ID_1$ 内の全体座標系を設定します。

次に、平均局所座標系を使用します。

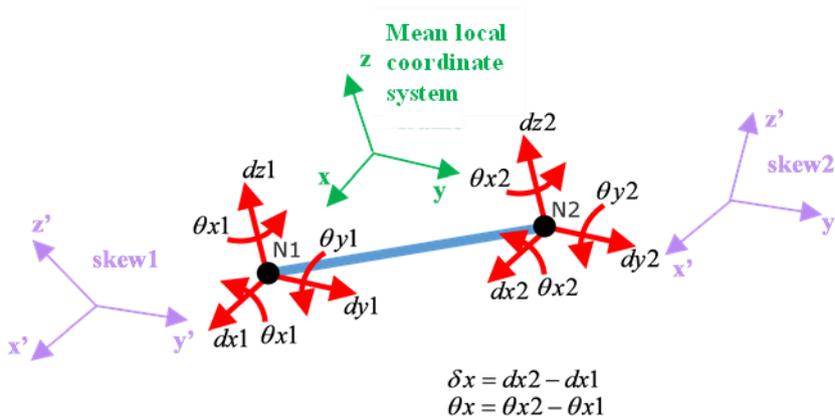


図 68: KJOINT2プロパティの自由度

See Also

/PROP/TYPE4 (SPRING) (Starter)

/PROP/TYPE8 (SPR_GENE) (Starter)

- /PROP/TYPE12 (SPR_PUL) (Starter)
- /PROP/TYPE13 (SPR_BEAM) (Starter)
- /PROP/TYPE25 (SPR_AXI) (Starter)
- /TH/SPRING (Starter)

スプリングTYPE4- 1自由度スプリング (/PROP/SPRING)

スプリングTYPE4は単純な物理スプリング、物理ダッシュポット、平行スプリングとダッシュポットです。
 時間ステップはスプリングの質量、剛性と減衰に依存します。

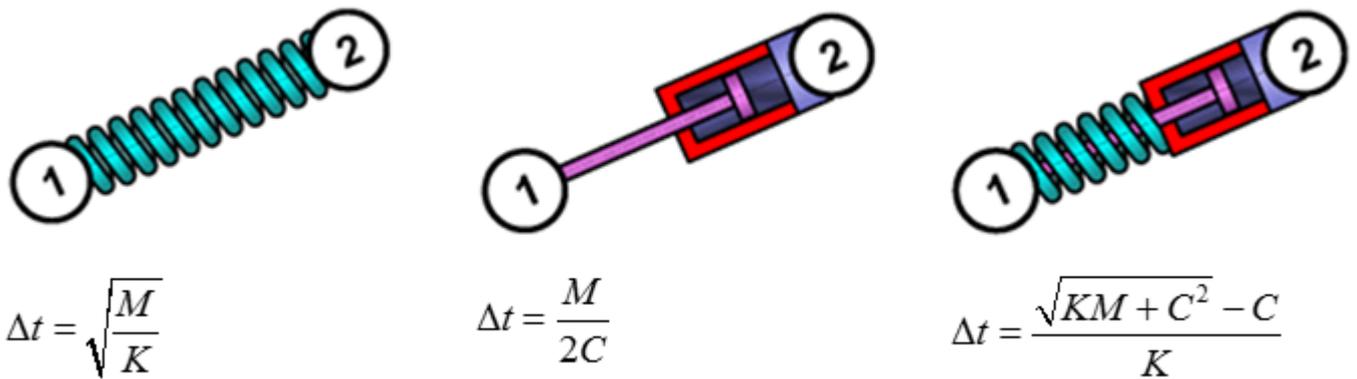


図 69: スプリングTYPE4 - 時間ステップ

限界時間ステップは陽的時間積分の安定性を保証しますが、スプリングの振動挙動の高い精度を保証するものではありません。自由スプリングの1振動周期の間、2つの時間ステップしかありません。真のSin関数挙動を再現するには、時間ステップを1/5以下に減らします。スプリングが2つのパートの結合に使用される場合、スプリングの振動周期が長くなり、デフォルトのスプリング時間ステップにより安定性と精度を保証できます。

スプリングTYPE4は1自由度のみを持ち、軸方向の伸びと圧縮にのみ抵抗します。2節点に作用する力は常に方向1-2と同一直線上になります。

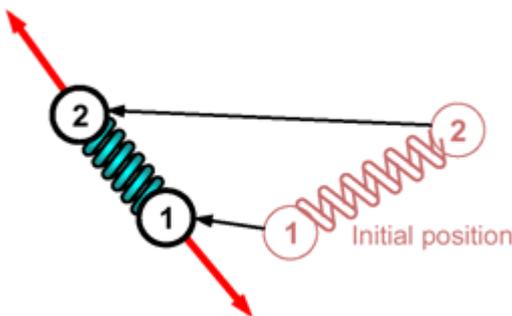


図 70: スプリングTYPE4での同一直線上の力

スプリングが圧縮を受ける場合、長さ0に到達する可能性があり、その時内力の向きは任意になります(図 71)。これは安定性の問題を引き起こす可能性があり、避けるべきです。

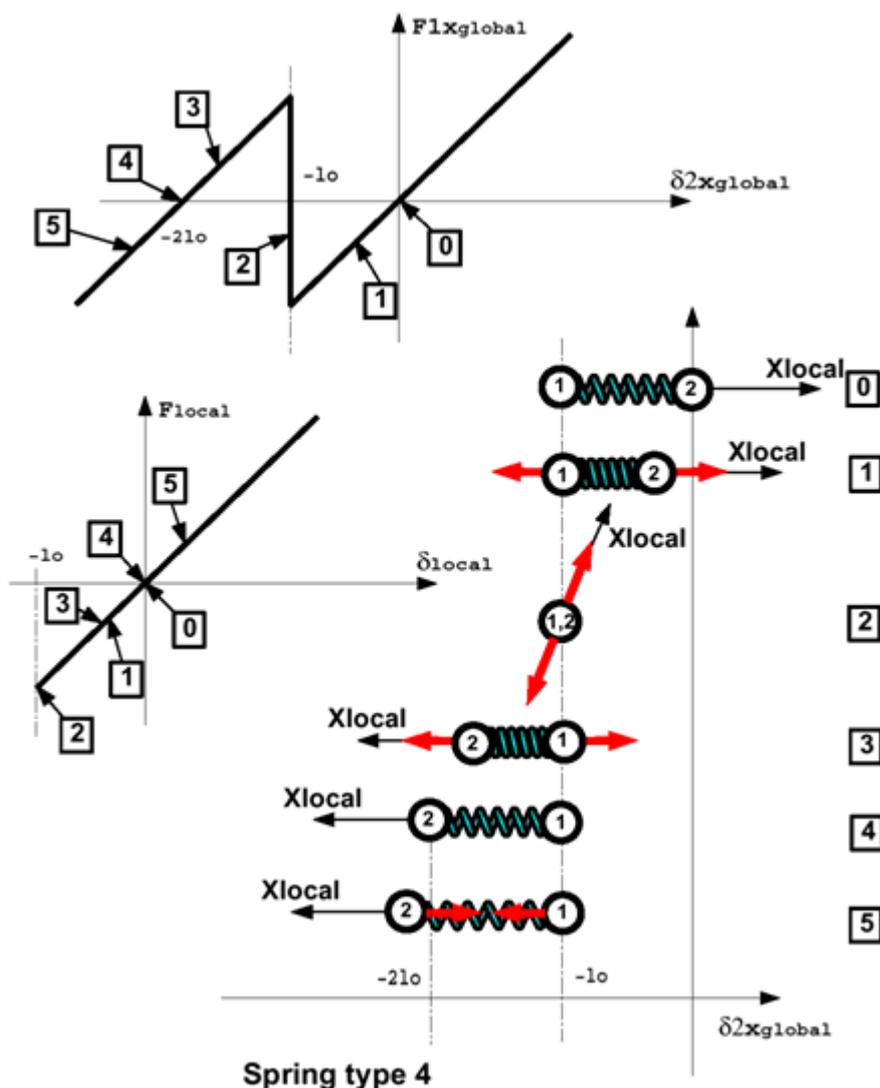


図 71: 長さ0のスプリングの不安定性

詳細については、*Radioss Theory Manual*をご参照ください。

汎用TYPE8スプリング (/PROP/SPR_GENE)

スプリングTYPE8は、3つの並進と3つの回転の合計6つの自由度を持つスプリングです。

各自由度は相互に独立しており、特定の剛性に関連付けられます(詳しくは剛性定式化参照)。限界時間ステップの計算には、次の式が用いられ、全ての自由度の最小値が保持されます:

$$dt = \min\left(\sqrt{\frac{M}{K}}, \sqrt{\frac{I}{K_\theta}}\right) \quad (32)$$

ここで、

l 慣性モーメント

K_θ 関連する剛性

局所スキュー(移動または固定)が指定されない場合、局所座標は節点位置には関係なく全体座標系が用いられます。

この数学的スプリングの物理挙動を理解するためには、2節点のスプリングが一緒につながれていることをイメージしてください。つまり、節点間の独立自由度としての相対的な並進 / 回転のみが考慮されます。図 72 に解説を示します。

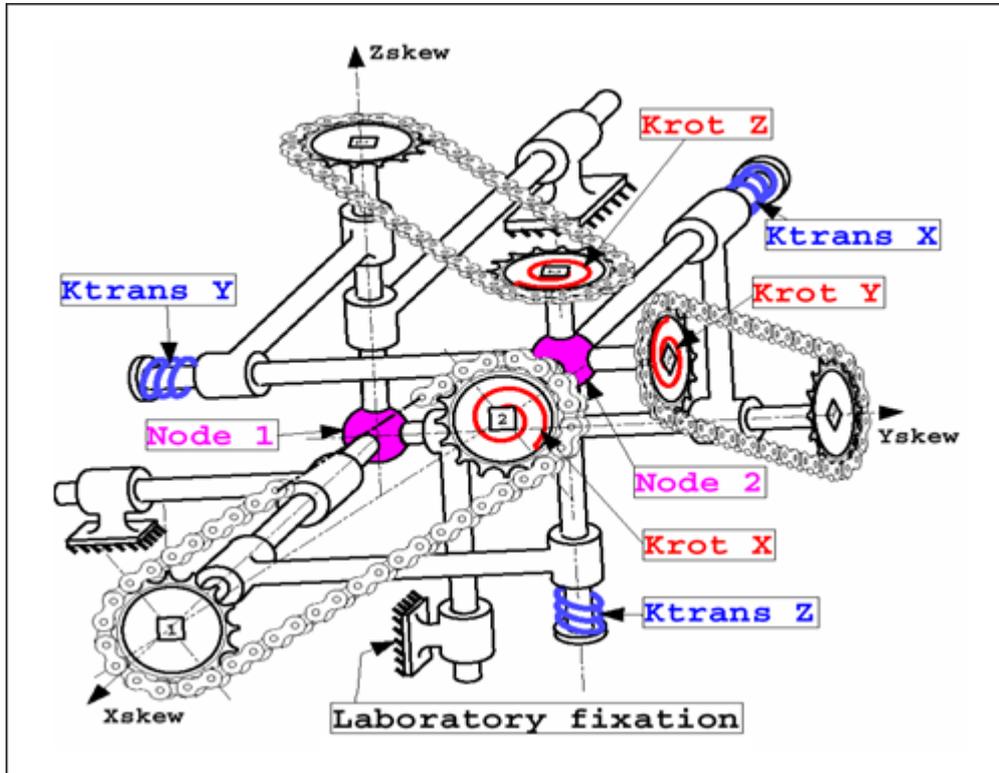


図 72: スプリングTYPE8

注: 移動スキューを用いて局所座標系が定義された場合、スプリングTYPE4の局所X軸の挙動を模擬することが可能で、移動スキューを定義する最初の2節点がスプリングの第1および第2節点となります(図 73)。

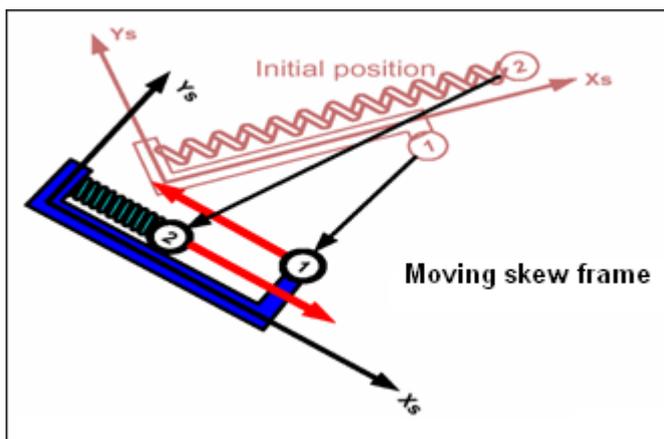


図 73: 局所X方向の変形

ここで、全体の力のつり合いは考慮されますが、全体のモーメントのつり合いはそうでないことが見て取れます。したがって、スプリングは欠落するモーメントが適用されるものに結合されます。一般的には、スプリングTYPE8は、1節点が全ての方向に固定され、2節点が一致する場合の使用を推奨します(2節点が一致する場合、並進剛性はシミュレーションの間に

節点が一致に近い状態を保つのに十分な剛性を持つ必要があります)。そうした場合、全体のモーメントのつり合いも考慮されます。

注: 長さが0でないTYPE8スプリングが剛体回転を受けた場合、エネルギー増加が観察されます。長さが0以外の時はスプリングTYPE8。

スプリングTYPE8は一般的に2つのパートの結合のモデル化に用いられます。例えば、ステアリングシステムのピボット点はスプリングTYPE8を用いてモデル化されます。この結合タイプのプロパティモデルでは、併進自由度はやや高い剛性を通してブロックされる必要があります、すべての回転自由度は自由である必要があります。以下はそのような結合の例で、剛性に与えられる値は任意ですが関連する単位系によって調整される必要があります。

注: その移動量は回転に急な増加のある非線形剛性を用いて制限を与えることも可能です(詳しくは剛性定式化参照)。

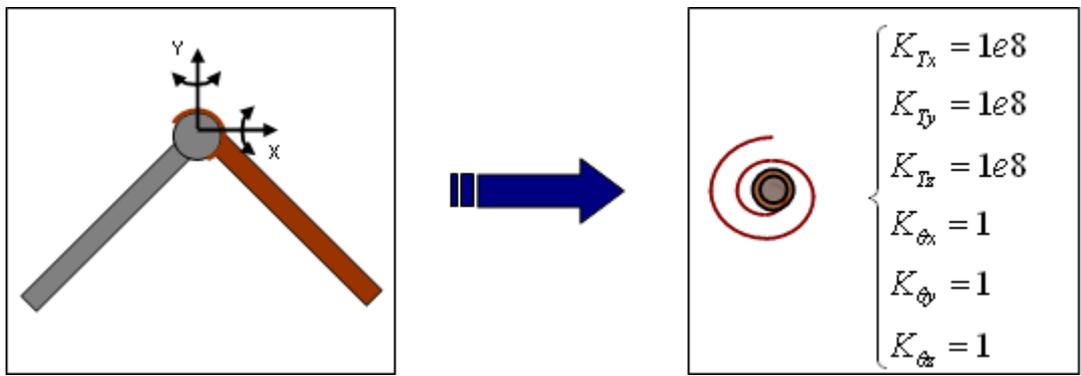


図 74: ヒンジのモデル化(スプリングTYPE8を使用)

詳細については、Radioss Theory Manual内のGeneral Spring Elements (TYPE8)をご参照ください。

スプリングTYPE12 - プーリー (/PROP/SPR_PUL)

スプリングTYPE12はプーリーのモデル化に用いられます。シートベルトのモデル化に用いられる時、これは3節点で定義されます。

節点2はプーリー位置に置かれ、可変形のロープが3節点に加わります(図 75)。スプリングの質量は3節点に、節点1と3に 1/4、節点2に 1/2 分配されます。

クーロン摩擦を節点2に2つのストランドの角度を考慮して与えることができます。摩擦なしでは、力は次のように計算されます:

$$|\mathbf{F}_1| = |\mathbf{F}_2| = K\delta \tag{33}$$

ここで、
 δ ロープの伸びの合計
 K 剛性

Coulomb摩擦が用いられた場合、力は次のように計算されます:

$$\mathbf{F}_{fr} = \min\left\{ \Delta\mathbf{F}, \max\left[0, (|\mathbf{F}_1| + |\mathbf{F}_2|) \cdot \tanh\left(\frac{\beta \cdot \mu}{2}\right)\right] \right\} \cdot \text{sig}(\Delta\mathbf{F}) \tag{34}$$

ここで、

$$\mu = f_{fr} \left(\frac{\Delta F}{X_{scale_F}} \right) \cdot Y_{scale_F}$$

β 角度(単位はラジアン)

f_{fr} fct_ID の関数 f_r

- $I_{fr} = 0$ (対称挙動)

$$\Delta F = |F_1 - F_2| \tag{35}$$

- $I_{fr} = 1$ (非対称挙動)

$$\Delta F = F_1 - F_2 \tag{36}$$

δ_1 はストランド1-2の伸び、 δ_2 はストランド 2-3の伸びです。

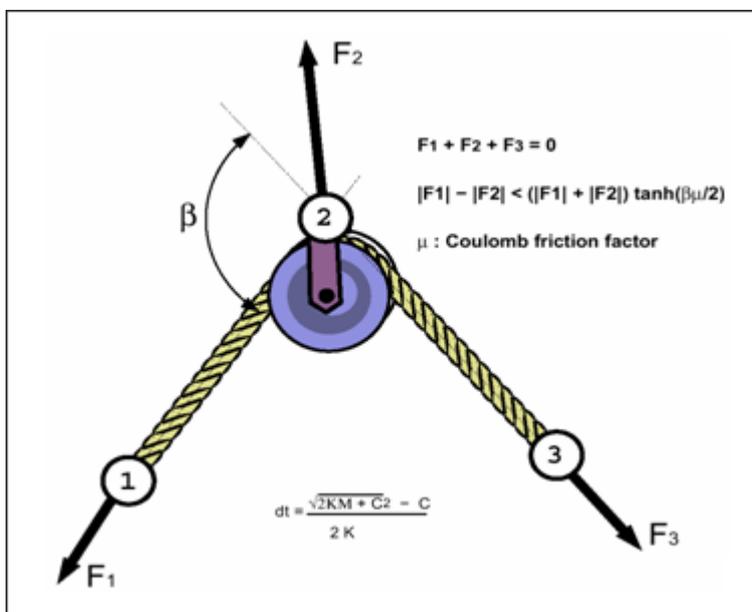


図 75: スプリングTYPE12、プーリー

時間ステップはスプリングTYPE4と同じ式で計算されますが、その剛性は、高い摩擦での安定性を保証するため2倍の値に置き換えられます。

 注: 節点1または節点3が節点2までスライドしないように、2つのストランドの長さが十分である必要があります。節点1と3に結び目があると、節点1と3は節点2で停止します。

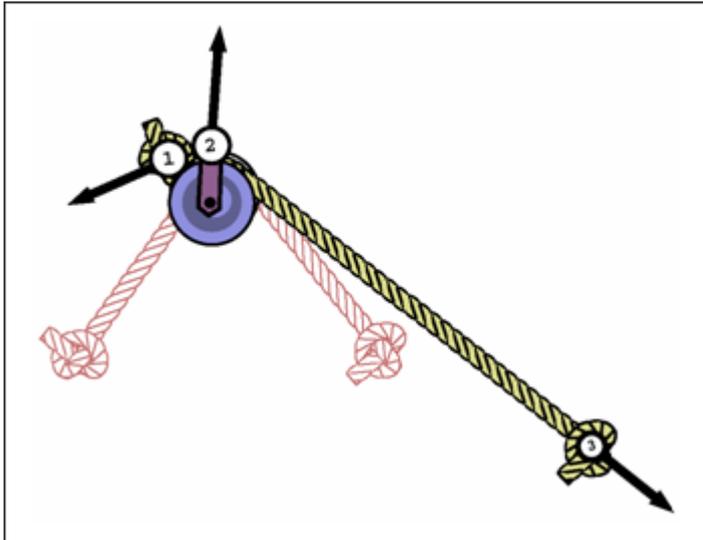


図 76: スプリングTYPE12、プーリー

詳細については、*Radioss Theory Manual*をご参照ください。

ビームタイプ13スプリング (/PROP/SPR_BEAM)

スプリングタイプ13は幾つかの独立変形モードを持つビーム要素のように機能します。

- 引張り / 圧縮
- ねじり
- 曲げ(2モード)
- せん断(2モード)

ビーム要素とは異なり、変位(または回転)と力(またはモーメント)の関係は形状(断面積、長さ、および慣性モーメント)と材料定数(ヤング率、せん断弾性係数)から計算されるものではありません。代わりに、これらは異なる剛性定式化を通してユーザー定義されます(詳しくは[剛性定式化](#)をご参照ください)。

スプリングタイプ13はその長さが0でない時だけ働きます。節点 1と2が局所X軸の定義に常に用いられます。局所 Y 軸は時刻 $t=0$ において定義され、それぞれのサイクルで平均の X 軸周りの回転を考慮して更新されます。初期のY 軸は複数の方法で定義できます。ビーム要素には第3節点を用いることができます。スキューフレームの局所Y軸を用いることも可能です。スキューフレームも第3節点も定義されていない場合、全体Y軸がスキューのY軸に取って代わります。Yスキュー軸が局所X軸と平行な場合、局所Y軸とZ軸は任意の位置に置かれます。そのZ-軸は最後に、X軸とY軸のベクトル積として計算されます。

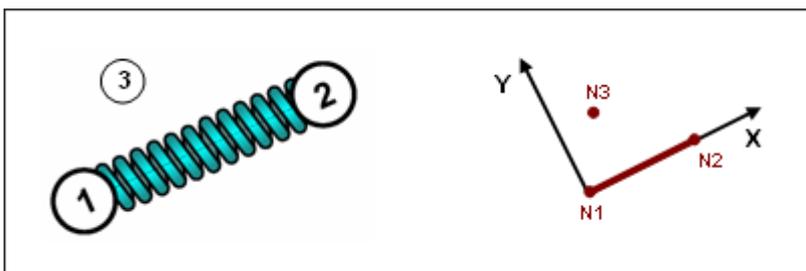


図 77: スプリングタイプ13

ビームタイプスプリングの図を以下に示します(図 78)。

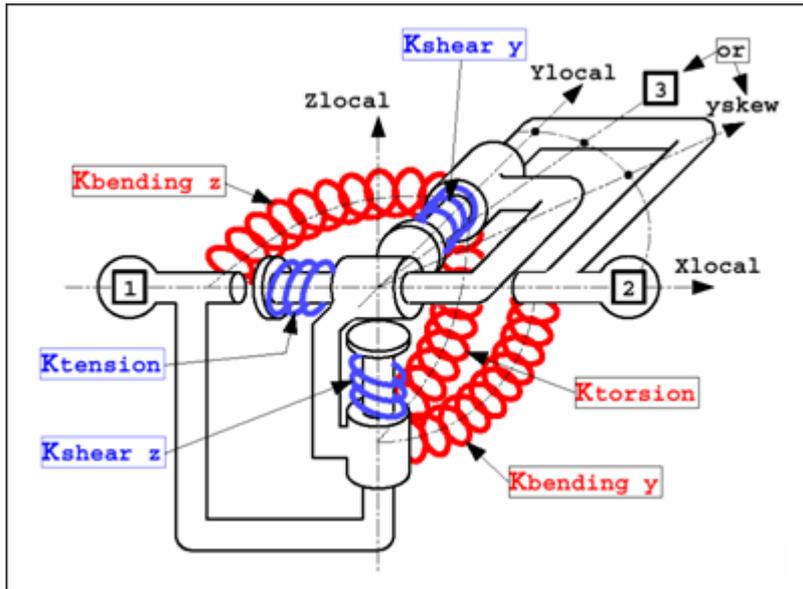


図 78: スプリングタイプ13

曲げ変形は図 79で説明されます。この変形は、2節点の回転の差のみを考慮します。ビームの二重曲げは曲げ変形を生成しますが、せん断変形は以下に示したようになります。

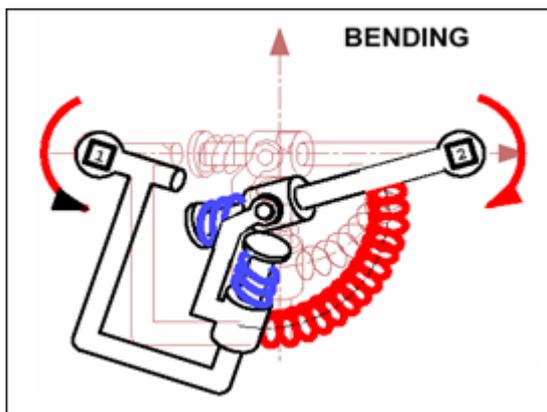


図 79: 曲げを受けるスプリングタイプ13

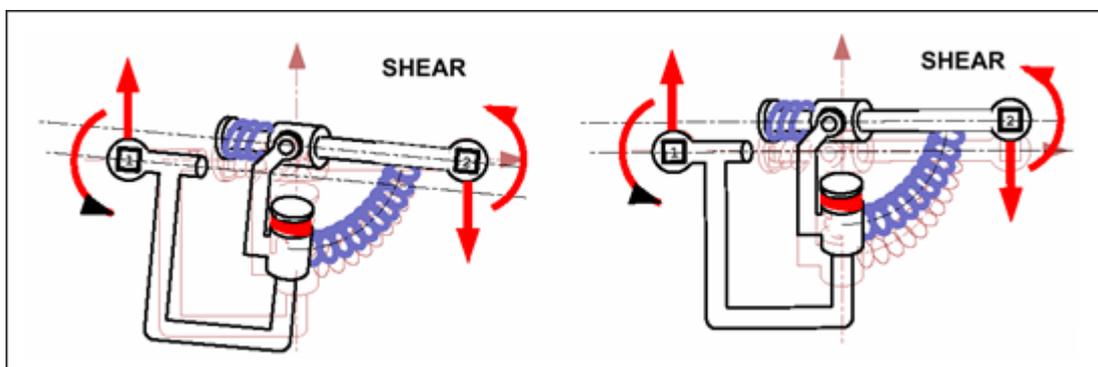


図 80: せん断-曲げを受けるスプリングタイプ13

ビームタイプスプリングは、実際のビームのように振る舞い、長さ方向の曲げモーメントの変化はせん断の増加を生成します。スプリングのせん断力は曲げモーメントの変化を含んでいます。

 注: スプリングのプロパティを定義する際は、物理的な意味のある値を導入することが強く推奨されます。高いせん断剛性と曲げ剛性ゼロのスプリングは推奨されず、間違った結果を生む可能性があります。

スプリングタイプ8と異なり、スプリングタイプ13では人工的な力およびモーメントを生成することなしに剛体回転が可能です。図 81では、剛体回転時のスプリングタイプ8および13の挙動を比較しています。

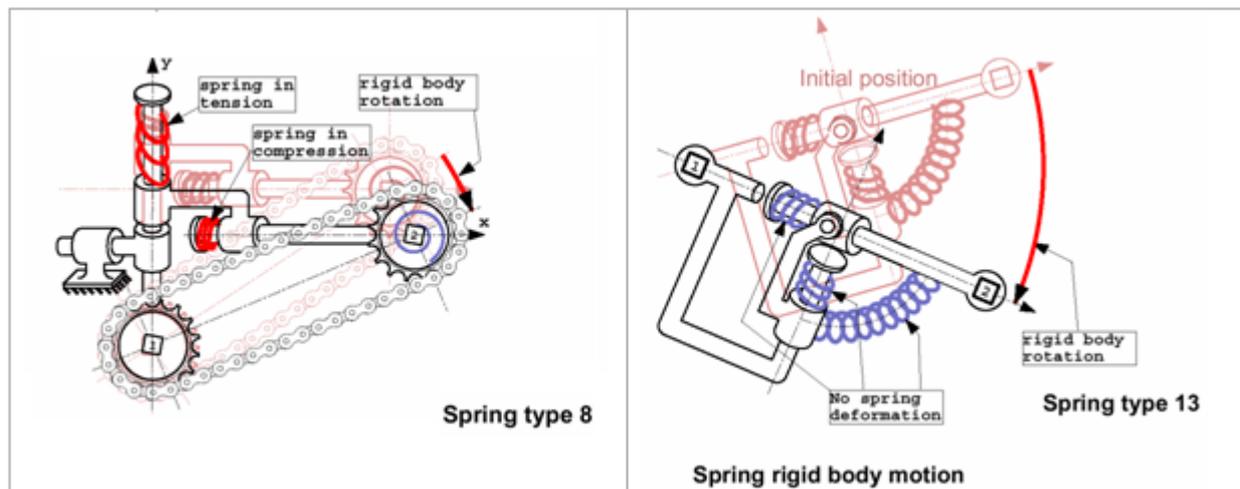


図 81: スプリングタイプ8と13の剛体移動

限界時間ステップの計算にはスプリングタイプ4と同じ式が用いられ、全ての自由度の最小値が最終的に保持されます。そのため、曲げとせん断の連成を考慮するため、曲げ剛性が修正されます:

$$K_{yy} \approx K_{yy} + l^2 K_z \quad (37)$$

$$K_{zz} \approx K_{zz} + l^2 K_y \quad (38)$$

スプリングタイプ8と13では、符号の規則が同じではないため、両者の結果を比較する場合には混乱が生ずるかもしれません。スプリングタイプ13では、変形の符号は初期長さの変化に基づきます。

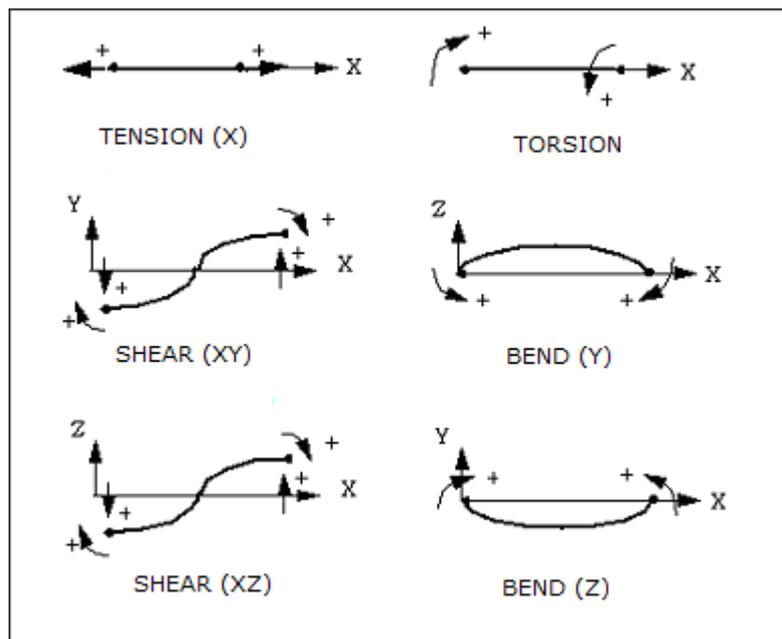


図 82: スプリングタイプ13の符号規則

スプリングが引張りを受ける場合、その変形は常に正となります(図 82)。これはスプリングタイプ8では真とは限りません。スプリングは1つ(あるいは全て)の方向で0となる事ができるため、正と負のスプリング変形は初期長さの変化として定義できません。符号の規則としては全ての自由度に対し、節点2の変位(または回転)から節点1の変位(または回転)を引いた値が正の場合(負の場合も同様)、その変形は正(負の場合も同様)となります。

図 83 は、Radiossで適用されている符号規則の結果としての、スプリングタイプ8と13の差異を説明しています。

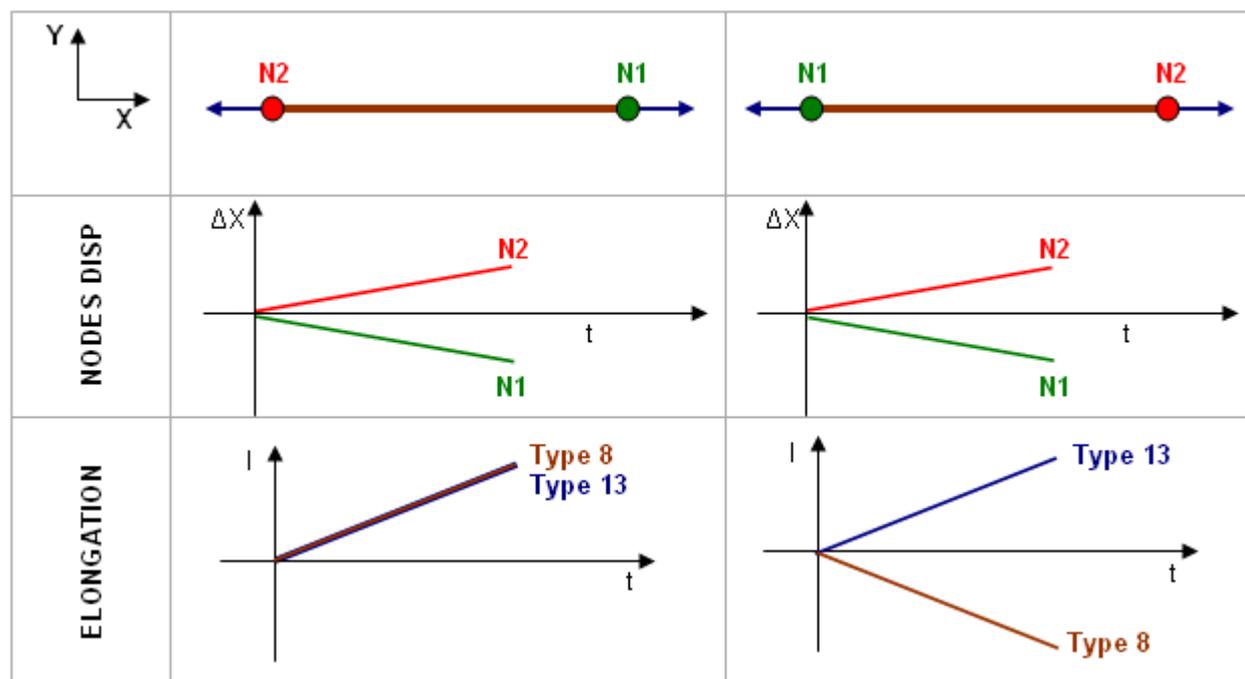


図 83: スプリングタイプ8と13の間の距離

詳細については、*Radioss Theory Manual*内のBeam Type Spring Elements (TYPE13)をご参照ください。

運動学的ジョイント TYPE33 (/PROP/KJOINT)

運動学的ジョイントは /PROP/KJOINT で宣言されます。ジョイントは1つのスプリングと結合された物体に属する2つの局所座標軸によって定義されます。

ここで局所軸の直交性を保証するため、結合されている物体は剛体であることを仮定します。しかしながら、変形可能な物体もジョイントに結合することができます。変形の間軸の直交性が崩れた場合、ジョイントの安定性は保証できません。

Radiossではいくつかの種類ジョイントが使用可能です。[運動学的ジョイントタイプ](#)にそれらをリストします。

運動学的ジョイントタイプ

タイプ番号	ジョイントタイプ	dx	dy	dz	θ_x	θ_y	θ_z
1	球	x	x	x	0	0	0
2	回転	x	x	x	0	x	x
3	円筒	0	x	x	0	x	x
4	平面	x	0	0	0	x	x
5	ユニバーサル	x	x	x	x	0	0
6	並進	0	x	x	x	x	x
7	オールダム	x	0	0	x	x	x
8	剛性	x	x	x	x	x	x
9	フリー	0	0	0	0	0	0

x: 固定自由度を示します。

0: フリー自由度(ユーザー定義)を示します。

ジョイントのプロパティは2つの結合された座標系に関して計算された局所座標系で定義されます。これらは最初の時点で一致している必要はありません。局所座標軸の初期位置が常に一致する場合は、ジョイントの局所フレームは平均位置に定義されます。次にその局所座標系はこれらの回転軸に関して計算されます。

6つのジョイント自由度があります: $\delta X'$, $\delta Y'$, $\delta Z'$, $\theta X'$, $\theta Y'$ および $\theta Z'$ の4つのパラメータのみを指定して使用できます。これらは局所スキューフレームで計算されます。

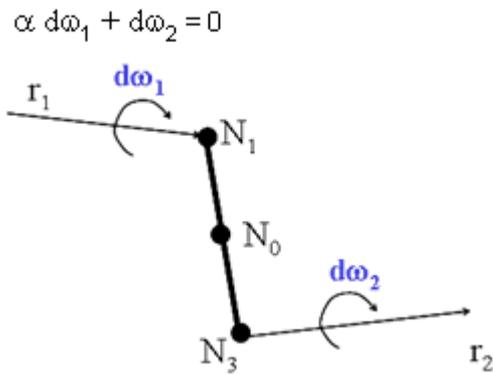


図 84: 運動学的ジョイントの定義

各ジョイントタイプでは、固定自由度とフリー自由度を区別します。固定自由度には剛性が一定しているという特徴があります。フリー自由度の剛性には大きい値を選択することを推奨します。フリー自由度では、ユーザー定義の特徴（線形または非線形弾性の場合がある）に臨界前粘性減衰を組み合わせます。

並進および回転自由度は次のように定義されます：

$$\delta = dx_2 - dx_1 \tag{39}$$

ここで、 dx_1 と dx_2 は局所座標系における2つのジョイント節点の全変位です。

$$\theta = \theta_2 - \theta_1 \tag{40}$$

ここで θ_1 と θ_2 は局所ジョイント座標フレームに関する2つの結合された物体の全相対回転です。

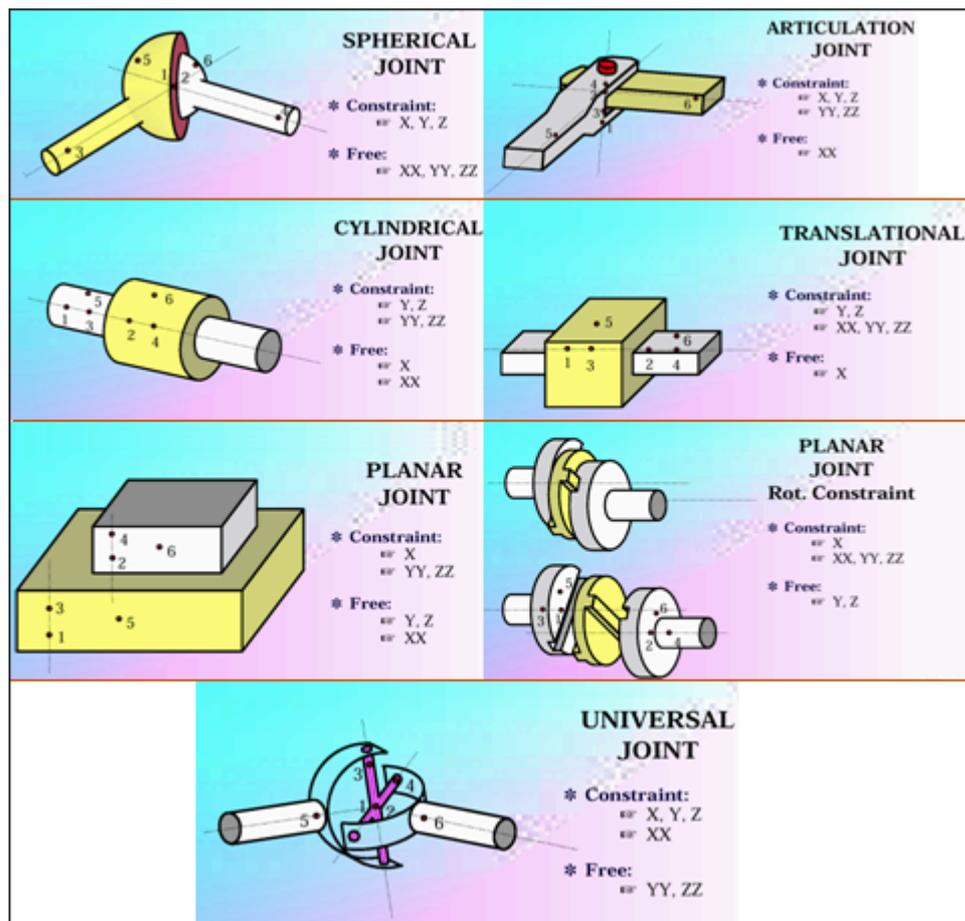


図 85: 運動学的ジョイントの概要図

力とモーメントの計算

方向 δ の力は次のように計算されます:

$$\text{線形スプリング: } \mathbf{F} = \mathbf{K}_t \delta + \mathbf{C}_t \dot{\delta}$$

\mathbf{K}_t : 並進剛性 (K_{tx} , K_{ty} および K_{tz})

\mathbf{C}_t : 並進粘度 (C_{tx} , C_{ty} および C_{tz})

$$\text{非線形スプリング: } \mathbf{F} = \mathbf{K}_t f(\delta) + \mathbf{C}_t g(\dot{\delta})$$

方向 θ のモーメントは次のように計算されます:

$$\text{線形スプリング: } \mathbf{M} = \mathbf{K}_r \theta + \mathbf{C}_r \dot{\theta}$$

\mathbf{K}_r : 回転剛性 (K_{rx} , K_{ry} , K_{rz})

\mathbf{C}_r : 回転粘度 (C_{rx} , C_{ry} , C_{rz})

$$\text{非線形スプリング: } \mathbf{M} = \mathbf{K}_r f(\theta) + \mathbf{C}_r g(\dot{\theta})$$

ジョイントの長さは0にすることもできます。球面ジョイントやユニバーサルジョイントの定義には長さ0のスプリングを用いることを推奨します。一般的なケースでのモーメントの全体での釣り合いを満足するため、回転自由度の補正項が次のように計算されます:

$$M_{\theta_x} = M_{\theta_x} + L_y \times F_z - L_z \times F_y \tag{41}$$

$$M_{\theta_y} = M_{\theta_y} + L_z \times F_x - L_x \times F_z \tag{42}$$

$$M_{\theta_z} = M_{\theta_z} + L_x \times F_y - L_y \times F_x \quad (43)$$

ジョイントはユーザー定義の質量や慣性をもつことができません、このため節点時間ステップが常に用いられます。

スプリングジョイントTYPE45 (/PROP/KJOINT2)

Radiossにおいて、プロパティTYPE45はジョイントタイプのスプリングです。

KJOINT2の自由度

KJOINT2の自由度は、オプション"Type"を使用して定義します。さまざまな自由度の組み合わせによって、さまざまなタイプのジョイントを作成できます。Radiossでは、次のタイプを使用できます：

表 8: 回転についてのみフリーな自由度

タイプ番号	ジョイントタイプ	dx	dy	dz	θ_x	θ_y	θ_z
1	球	x	x	x	0	0	0
5	ユニバーサル (Universal) (開発ソースのみ)	x	x	x	x	0	0
2	回転	x	x	x	0	x	x

x: 固定自由度を示します。

0: フリー自由度(ユーザー定義)を示します。

表 9: 並進についてのみフリーな自由度

タイプ番号	ジョイントタイプ	dx	dy	dz	θ_x	θ_y	θ_z
6	並進	0	x	x	x	x	x
7	オールダム	x	0	0	x	x	x

x: 固定自由度を示します。

0: フリー自由度(ユーザー定義)を示します。

表 10: 並進と回転についてフリーな自由度

タイプ番号	ジョイントタイプ	dx	dy	dz	θ_x	θ_y	θ_z
3	円筒	0	x	x	0	x	x
4	平面	x	0	0	0	x	x

x: 固定自由度を示します。

0: フリー自由度(ユーザー定義)を示します。

表 11: 特殊な自由度

タイプ番号	ジョイントタイプ	dx	dy	dz	θ_x	θ_y	θ_z
8	剛体	x	x	x	x	x	x
9	フリー	0	0	0	0	0	0

x: 固定自由度を示します。

0: フリー自由度(ユーザー定義)を示します。

表 12:

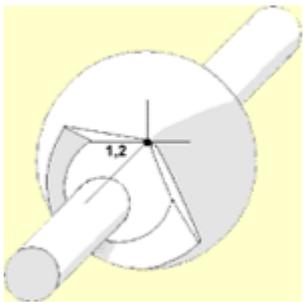
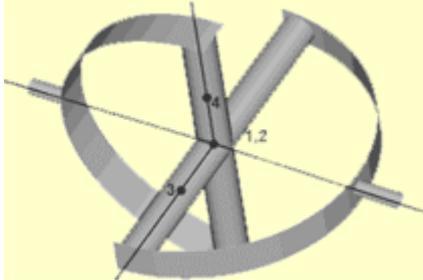
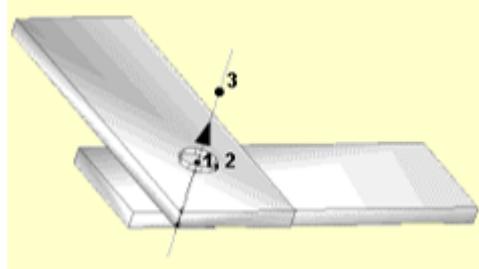
		
<p>図 86: 球</p>	<p>図 87: ユニバーサル</p>	<p>図 88: 回転</p>

表 13:



自由度の座標は、スプリング力の計算に使用される座標です。これは、必ずしもスプリングの局所座標系ではありません。さまざまなタイプのKJOINT2とスキューの定義に応じて、さまざまな座標系がスプリング力の計算に使用されます。

KJOINT2の剛性と減衰

KJOINT2プロパティでは、以下の4タイプの剛性が使用されます。

1. 固定された剛性 K_n 。たとえば、固定された剛性 = Yesについて：
 - Type = 1 (球) の場合、 K_n は並進方向 d_x, d_y, d_z で固定されています。
 - Type = 6 (並進) の場合、 K_n は並進方向 d_y, d_z と回転方向 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ で固定されています。

表 14:

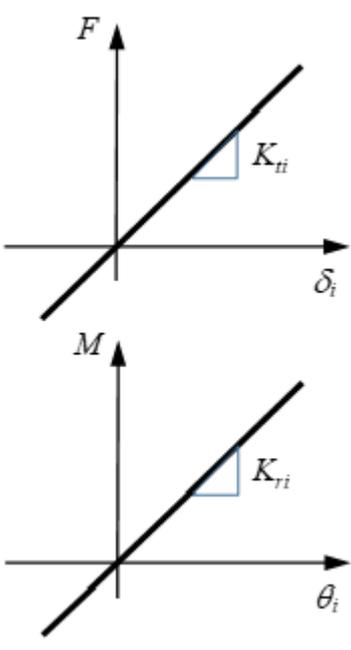
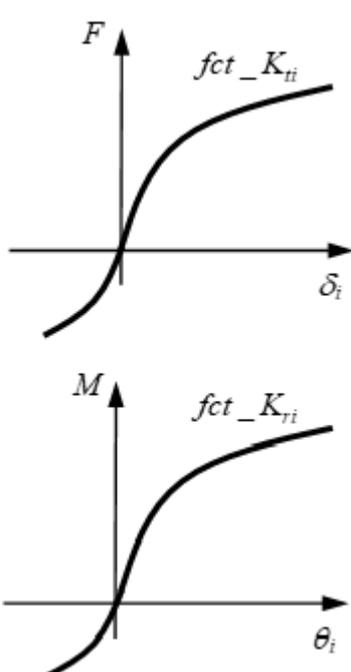
タイプ番号	ジョイントタイプ	dx	dy	dz	θ_x	θ_y	θ_z
1	球	x	x	x	0	0	0
6	並進	0	x	x	x	x	x

$K_n = 0$ (デフォルト) の場合、Radiossは固定された剛性を内部で計算します。 $K_n > 0$ の場合、ユーザー定義の固定された剛性が使用されます。

2. 並進剛性 K_{ti} と回転剛性 K_{ri} 。これらの剛性は、フリー自由度の方向で、力とモーメントの計算に使用されます：

表 15:

線形スプリング	非線形スプリング
$F = K_{ti} \delta$	$F = K_{ti} f(\delta)$
$M = K_{ri} \theta$	$M = K_{ri} f(\theta)$
K_{ti} : 並進剛性 (K_{tx}, K_{ty}, K_{tz})	K_{ti} : 並進剛性係数 (K_{tx}, K_{ty}, K_{tz})

線形スプリング	非線形スプリング
<p>K_{ri}: 回転剛性 (K_{rx}, K_{ry}, K_{rz})</p>  <p>図 92:</p>	<p>K_{ri}: 回転剛性係数 (K_{rx}, K_{ry}, K_{rz})</p> <p>$f(\delta)$: 並進剛性関数 fct_K_{ti}</p> <p>$f(\theta)$: 回転剛性関数 fct_K_{ri}</p>  <p>図 93:</p>

3. 並進粘性係数 C_{ti} と回転粘性係数 C_{ri} は減衰用です。これらの粘性係数は、フリー自由度の方向で、力とモーメントの計算に使用されます。

表 16:

線形スプリング	非線形スプリング
<p>$\mathbf{F} = \mathbf{C}_{ti} \dot{\boldsymbol{\delta}}$</p> <p>$\mathbf{M} = \mathbf{C}_{ri} \dot{\boldsymbol{\theta}}$</p> <p>$C_{ti}$: 並進剛性 ($C_{tx}$, C_{ty}, C_{tz})</p> <p>C_{ri}: 回転剛性 (C_{rx}, C_{ry}, C_{rz})</p>	<p>$\mathbf{F} = \mathbf{C}_{ti} \mathbf{g}(\dot{\boldsymbol{\delta}})$</p> <p>$\mathbf{M} = \mathbf{C}_{ri} \mathbf{g}(\dot{\boldsymbol{\theta}})$</p> <p>$C_{ti}$: 並進剛性係数 ($C_{tx}$, C_{ty}, C_{tz})</p> <p>C_{ri}: 回転剛性係数 (C_{rx}, C_{ry}, C_{rz})</p> <p>$\mathbf{g}(\dot{\boldsymbol{\delta}})$: 並進剛性関数 fct_C_{ti}</p> <p>$\mathbf{g}(\dot{\boldsymbol{\theta}})$: 回転剛性関数 fct_C_{ri}</p>

たとえば、一定速度 = 1.33での引張スプリング(KJOINT2を使用)については次のようになります:

- 並進剛性のみが $K_t = 100$ に設定されている場合、力(下図の緑色の曲線)は K_t で増加します。

- 並進粘性のみが $C_t = 50$ に設定されている場合、引張速度が一定であるため、力(下図のオレンジ色の曲線)は一定です。力は $Force = C_t \dot{\delta} = 50 \times 1.33 = 66.5$ となります。
- 並進剛性 $K_t = 100$ と並進粘性 $C_t = 50$ の両方が設定されている場合、力(下図の青色の曲線)は上記2つのケースを組み合わせたものになります($Force = K_t \delta + C_t \dot{\delta}$)。

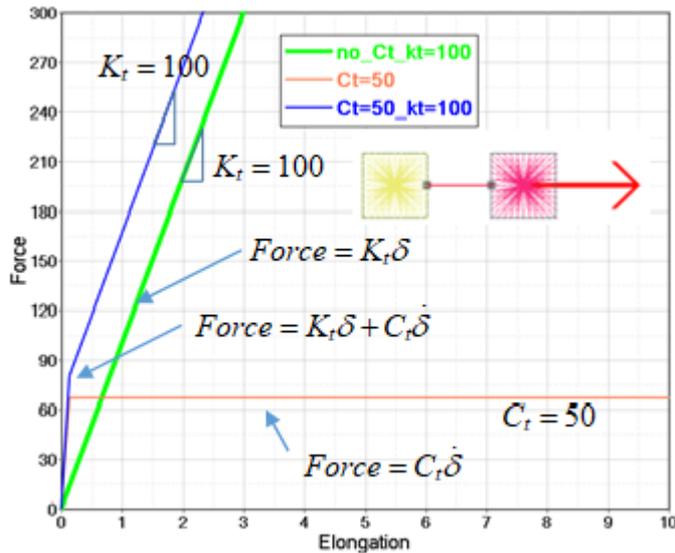


図 94:

4. 並進方向の摩擦剛性 $K_{f_{xi}}$ と回転方向の摩擦剛性 $K_{f_{ri}}$ 。これらを使用してペナルティ力を計算することで、変位が SD_{i+} , SD_{i-} の限界を超えたり、回転が SA_{i+} , SA_{i-} の限界を超えることが防止されます。

$K_{f_{xi}}$, $K_{f_{ri}}$ が設定されていない場合、Radiossは非常に大きい剛性を使用してこれらの値を自動的に計算します。

たとえば、 $SD_{i+} = 100$ と設定した以下の引張試験では、以下ようになります:

- $K_{f_{xi}}$ が設定されていない場合(下図の左側)、 $SD_{i+} = 100$ という限界に達した後に、非常に大きな剛性が使用されます。
- $K_{f_{xi}} = 1000$ が設定されている場合(下図の右側)、 $SD_{i+} = 100$ という限界に達した後に、 $K_{f_{xi}} = 1000$ が使用されます。

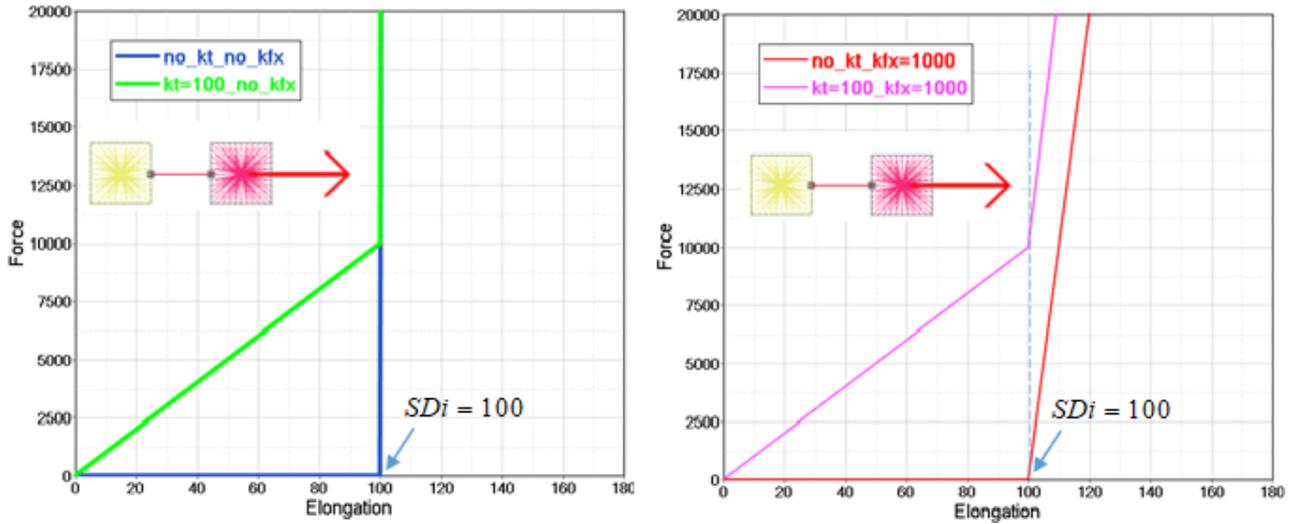


図 95:

上記の試験では、並進剛性 K_{ti} も示されています。この剛性が力に影響を及ぼすのは、 SD_{i+} の限界に達する前のみです。 $K_{f,xi}$ の値は、小さすぎるとはいけません。この値は、限界に達した後のブロッキング挙動をシミュレートするために使用されます。 $K_{f,xi}$ の値が小さすぎると、次のエラーメッセージが表示されます:

```
WARNING ID :          979
** WARNING IN FRICTION DEFINITION FOR KJOINT2
DESCRIPTION :
  ELASTIC STIFFNESS 0.10000000000000 IS SMALLER THAN THE MAX DERIVATIVE
  720.000000000000 OF THE
  FRICTION FUNCTION 0
```

- K_{ti} は設定されていないが、 $K_{f,xi} = 1000$ である場合。下図の左側では、一定の摩擦力 $FF_i = 15000$ がスプリング力に与える影響を示しています。 $FF_i = 15000$ の場合、力は $K_{f,xi}$ の剛性で15,000まで増大した後、限界 SD_{i+} に達するまで一定のままとなります。 SD_{i+} に達した後、力は剛性 $K_{f,xi}$ で再び増加します。
- 前のケースのように、追加で設定した並進剛性が $K_{ti} = 100$ である場合(下図の右側)、力は $K_{f,xi}$ で、 $FF_i + K_{ti}\delta_i = 15000 + 100 \times 15 = 16500$ まで増加してから、限界 SD_{i+} に達するまで並進剛性 $K_{ti} = 100$ で増加します。 SD_{i+} に達した後、力は剛性 $K_{f,xi}$ で再び増加します。

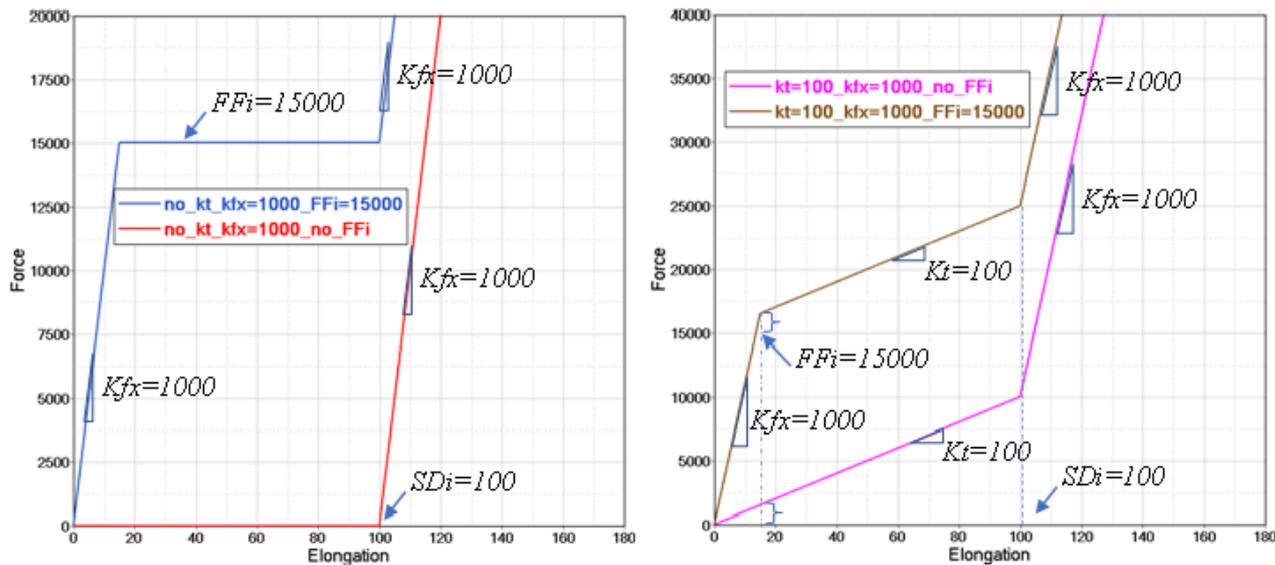


図 96:

K_{fxb} K_{fri} を設定する必要があるのは、停止限界に達した後の摩擦挙動を考慮する必要がある場合です。その必要がない場合は、摩擦（一定の摩擦 FF_i , FM_i または摩擦曲線 fct_FF_i , fct_FM_i ）が設定されている場合でも、Radioss は内部で計算された（非常に大きい）剛性を使用して、限界に達した後の力（またはモーメント）の挙動を処理します。

軸対称スプリングTYPE25 (/PROP/SPR_AXI)

このスプリングは、スプリングタイプ13を単純化し、スプリング断面特性がYとZ方向に関して変わらない事が考慮されています。

これにより、入力フォーマットを単純化してエラーを回避することが可能です。このスプリングの詳細については、*Radioss Starter Input Manual* または *Radioss Theory Manual* をご参照ください。

メッシュに関する推奨

ここでは、衝突解析と陰解法解析において推奨するメッシュに関するいくつかの点を紹介します。

推奨される要素数

構造の作業方向の長さには少なくとも5から10要素を設定することが推奨されます。座屈を考慮する場合は座屈波形の方向に5 から10要素を設定することを推奨します (図 97)。

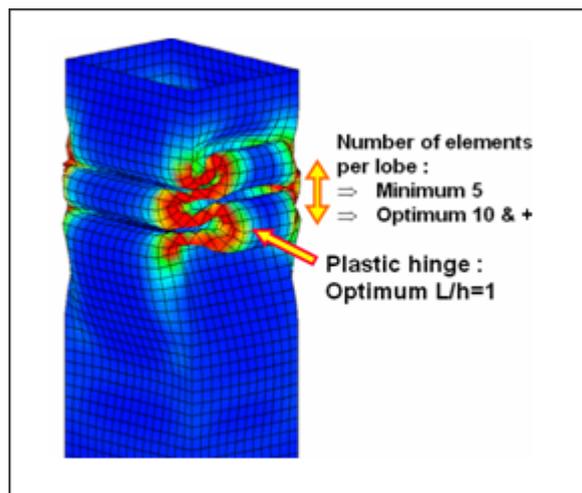


図 97: 座屈波形方向の要素の数

これに対して、メッシュの最小要素サイズと時間ステップとの間の直接の関係から、形状の詳細を省略することは、それが平均要素サイズよりも小さい場合には意味を持ちます(図 98)。一様なメッシュで、時間ステップを最適化し、衝撃波が伝播する際の運動量の伝達の一貫性を保証して、付随して起きる反射を避けることができます。より良い弾塑性挙動のためには幅方向に少なくとも3要素は必要です。

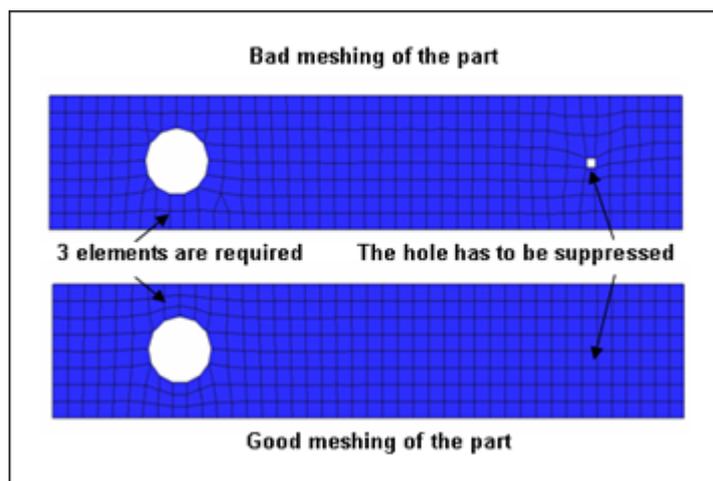


図 98: 穴のある部分のためのサーフェスマッシュ生成

機械的な挙動を考慮できる最小要素数を考察してみます。幅方向の最小要素数は:

- パートにほぼ一様な応力が圧力またはせん断として作用し、曲げのない場合は1
- 弾性挙動で曲げを含む場合は2
- 弾塑性挙動で低い精度の場合は3
- 弾塑性挙動で良い精度の場合は5
- 弾疎塑性挙動で良い精度で、局所的な荷重または局所的な不連続を含む場合には10

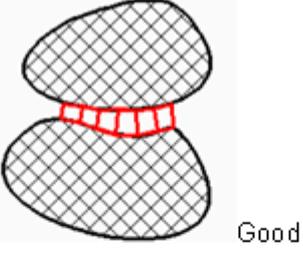
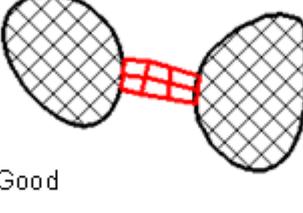
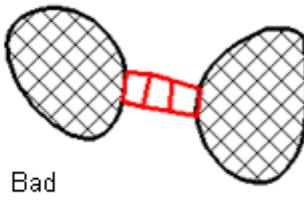
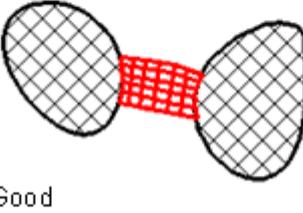
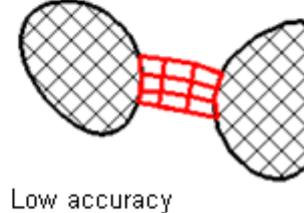
Shear or compression/traction		
Elastic bending		
Elastoplastic bending		

図 99: 最小要素数

メッシュの遷移

与えられた物理パートに異なるシェルの定式化を用いることは推奨されません。完全積分と低減積分要素は同じ剛性マトリックスではありませんが、質量マトリックスは同じです。これらの2種類の要素の間の運動量の伝達には乱れが起こるかも知れません。

三角形の数を減らして、メッシュの一貫性を改良する図 100に示されたメッシュの遷移を用いることができます。

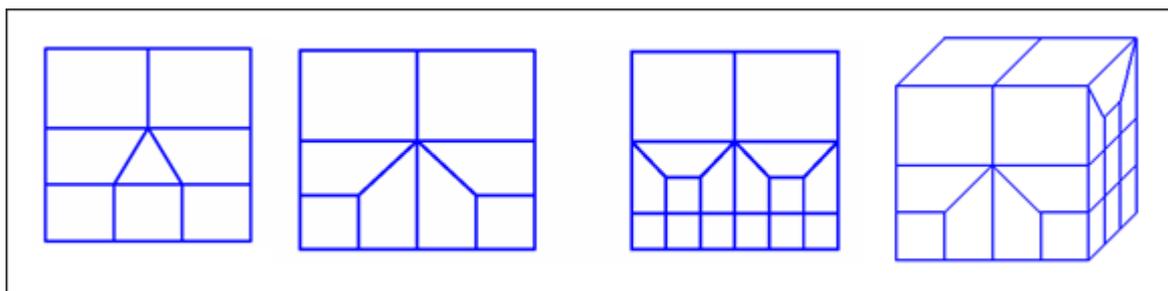


図 100: メッシュの遷移の例

メッシュパターン

1点積分では、要素の定式化が完全に悪くなる要素形状はありません（要素の角度が180度より大きくなってもお働き、精度は悪化しますが、数値的な問題は起こりません）。要素はできるだけ規則的で、その角度は一般的に45と120度の間にすることが推奨されます。最小と最大エッジの比は陽的定式化においては重大ではありません。質量を構造上に均一に分布させるため、均一なメッシュを推奨します。三角形の生成は、円や三角形形状でも避けることは可能です(図 101)。

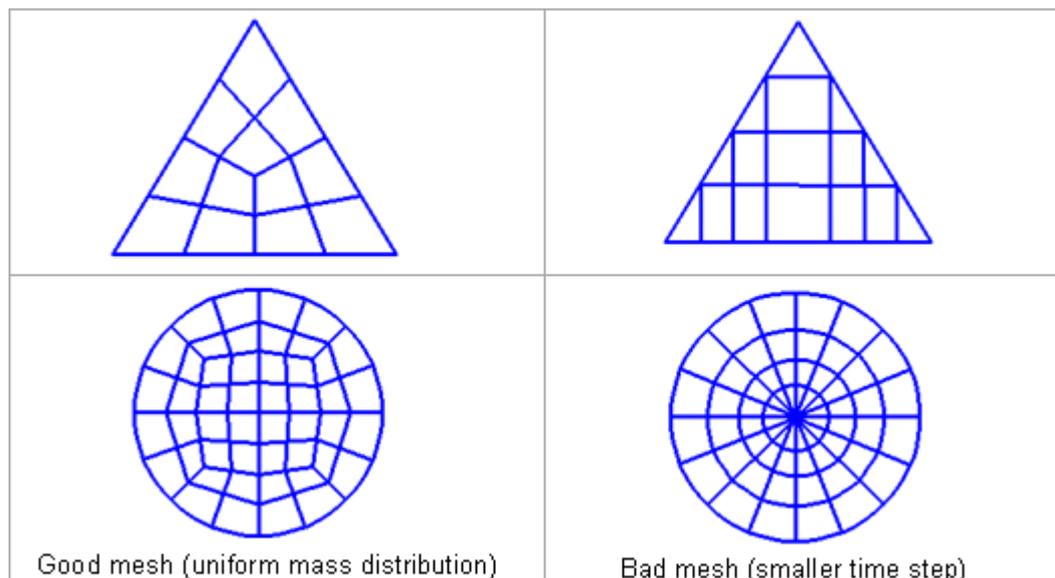


図 101: メッシュの遷移の例

Radiossでは、どのような種類のメッシュ品質が与えられるかは、要素のロバスト性に依存することがあります。陽解法での実行は、陰解法の場合と異なる点に注目する必要があります。例えば、均一なメッシュは陽解法で陰解法よりも重要で(時間ステップのため)、正のヤコビアン、反り、ゆがみ、アスペクト比は陰解法で陽解法よりも重要となります(収束性のため)。初期のメッシュ品質が良いということは、良いシミュレーション結果を得るために必要です。

アワグラス定式化

衝突問題では低減積分要素は非常によく知られています。これらの要素では、計算時間削減のため低減された数の積分点が使われます。この簡易化は、アワグラスモードと呼ばれるゼロエネルギー変形モードを生成します。

図 102に示されたように、中央の1点積分のシェル要素の非対称変形に、物理変形モードとしてゼロエネルギーモードを見つけることができます。物理的な視点からはこれは正しくなく、修正する必要があります。シェルメッシュでは、2つのアワグラスモードは面内(膜モード)と面外(Wモード)です。

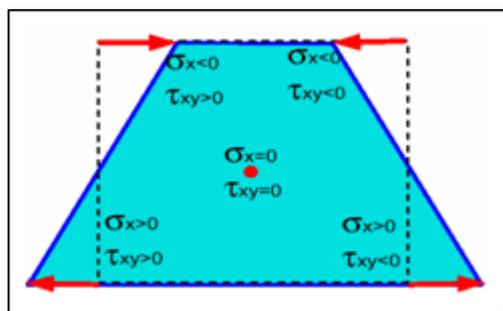


図 102: 次数低減積分シェルでのゼロエネルギーモード生成

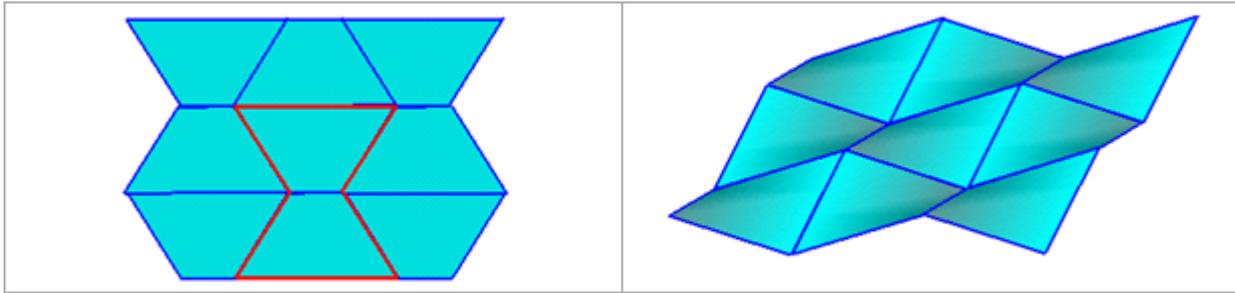


図 103: 面内と面外アワグラスモード

2つの修正方法があります:

- 摂動またはペナルティ法: 要素変形の安定性を維持するため、アンチアワグラス力を付加するアワグラスコントロール(古典的方法)。
- 物理安定化法: 解析的な視点から内部エネルギーを補正することによるアワグラスコントロール。

最初の手法では、Radiossで4つの定式化が利用可能:

- タイプ1(デフォルトのオプション): 面内モードのみを修正、シェルとソリッドで有効。
- タイプ2: 古い定式化で、推奨されない。
- タイプ3: アンチアワグラス力の計算時には塑性が考慮される。面内と面外アワグラスモードを修正。シェルでのみ使用可能。
- タイプ4: タイプ1と似ているが、アンチアワグラス力の計算で追加の高次項を使用し、面外アワグラスモードも修正。シェルでのみ使用可能。

2番目の手法は強力で、メッシュ品質が良い時に用いることができます。物理安定化法は次のRadioss要素に導入されています:

- QEPHシェル
- HEPHソリッド
- HSEPHソリッド-シェル

アワグラス定式化の選択は結果の品質に不可欠な役割を持ちます。メッシュが十分に細かい場合、物理安定化法を用いることができます。そうでない場合、シェルメッシュに対してはタイプ 3 と 4 の定式化が推奨されます。材料が弾塑性挙動下にある場合にはタイプ 3 定式化がより効率的です。アワグラス係数 hm と hf は0.1にセットすることが推奨されます。しかしながら、 hrl にはデフォルト値 $hf=0.01$ を用いることができます。

応力-ひずみ計算オプション(/PROP)

普通、微小ひずみ定式化は変形が小さい問題のシミュレーションに用いられます。典型的な適用分野は、線形弾性での検討です。弾塑性挙動と大変形での非線形問題では、大ひずみと大変位定式化を用いることが推奨されます。

大きなメッシュのゆがみを伴ういくつかの問題では、大ひずみ定式はいくつかの制限が生じます。時間ステップの減少が大きくなり過ぎると、CPU時間が大きく増加し、ソリッド要素が負の体積に到達すると、計算がストップするか、その要素が削除されなければならなくなります。

微小ひずみ定式化ではこれらの制限はなくなります。大変形の場合に微小ひずみの定式を用いることは驚くべきことかも知れませんが、要素削除よりは良い解になり得ます。ある材料、例えばハニカムのようにポアソン効果のない場合、適当な応力-ひずみ曲線を用いるだけで微小ひずみの制限は修正できます。

大ひずみ定式化

デフォルトでは、Radiossは大ひずみ、大変位定式化を陽的時間積分と共に用います。それぞれのサイクルで、形状関数の微分を計算することにより、大変位定式化が得られます。ひずみ増分の計算より大ひずみの定式化の結果となります。そのため、応力とひずみは、真応力と真ひずみとなります。

Cauchy応力(真応力)の時間積分は次のように実行されます:

$$\sigma_{ij}(t + \delta t) = \sigma_{ij}(t) + \frac{d\sigma_{ij}(t)}{dt} dt \quad (44)$$

応力速度の客観性は応力テンソルが材料の剛体回転に従うことを意味します。応力速度は要素の平均剛体回転とひずみ速度の関数となります。陽解法スキームの安定性は Courantの安定条件により与えられます:

$$\Delta t < \frac{l}{c} \quad (45)$$

ここで l は要素の特性長さ、 c は音速です。時間ステップはそれぞれのサイクルで計算されます。大きな要素変形では大きな時間ステップの減少を起し得ます。非常に大きな変形では、負の体積に到達することがあり、その時には体積の応力積分が不可能になります。

微小ひずみ定式化

時間の間での一定のヤコビアンマトリックスと一定体積を仮定すると、前の式は微小ひずみ定式化に退化します。全ての特別な値は、時刻 $t=0$ (または微小ひずみが定式化が開始された時) で定義された値になります。

時間ステップは一定になります:

$$\Delta t = \frac{l_0}{c} \quad (46)$$

このため、負の体積は計算に影響を与えなくなります(初期の体積のみが用いられるため)。しかし、ハニカムなどのある特定の材料挙動に微小ひずみの仮定を受け入れることが可能でも、微小変位の仮定は衝突解析には明らかに推奨されません。

応力の客観性では、ヤコビアンマトリックスの時間変換は要素の変形と要素の剛体回転に依存します。剛体並進移動はヤコビアンマトリックスに影響を与えません。要素の変形が考慮されない場合、微小ひずみの定式化が得られます。要素の剛体回転が無視できる場合、微小変位の定式化が得られます。

ΔT_{\min} に到達した後で微小ひずみ定式化に切り替えるために、Engineファイルで以下のオプションを用いることができます:

```
/DT/BRICK/CST
```

```
 $\Delta T_{sca} \Delta T_{\min}$ 
```

```
/DT/SHELL/CST
```

```
 $\Delta T_{sca} \Delta T_{\min}$ 
```

```
/DT/SH_3N/CST
```

```
 $\Delta T_{sca} \Delta T_{\min}$ 
```

 **注:** 一部のソリッド材料則では、音速は圧力依存です。それゆえ、その時間ステップは ΔT_{\min} よりも若干小さくなる可能性があります。

応力とひずみの更新(/PROP)

Radiossでは2つの定式化が利用可能です(図 104):

- 共回転定式化(CR): それぞれの要素の有限要素方程式は2つの座標系を参照します。要素の剛体移動を計算するために固定または基礎の形状が用いられます。次に変形した現在の状態は、初期参照の剛体移動によって得られた共回転形状を参照します。
- 更新ラグランジ定式化(ULF): 参照は最後の既知の(受け入れられた)解となります。これはステップの間固定されたままで、それぞれのステップの終了時に更新されます。

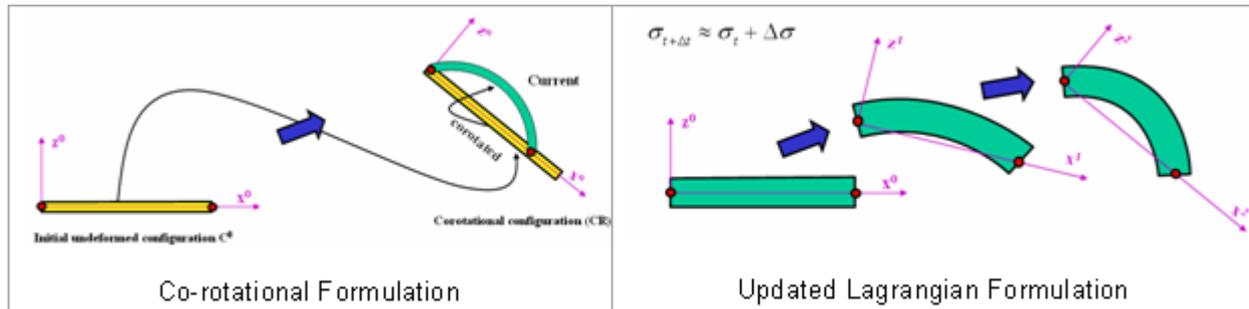


図 104: Radiossでの更新手法

共回転定式化は、幾何学的非線形構造解析の最も最近の定式化です。これは微小ひずみの材料非線形性を幾何学的非線形性から分離し、材料非線形性による異方性挙動のフレームからの中立性の問題を自然に取り扱うことができます。以前からあるRadiossソリッド要素では、共回転定式化はオプションで、計算前にアクティブにする必要があります(RADIOSS Starter入力マニュアルの/PROP/SOLID参照)。

注: 更新ラグランジ定式化では、それぞれのサイクルでの更新の誤差の累積のため、大きなせん断変形を受けるソリッドの結果を正しく取り扱えないことがあります。特に、大きなせん断変形や、大きな剛体移動を受ける要素では、共回転定式化の使用を強く推奨します。

Radiossの座標系

座標系にシェルおよびソリッド(厚肉シェル)要素が導入されます。

- 全体座標系(X、YおよびZ)
- 固有座標系(アイソパラメトリックフレーム)(ξ, η, ζ)
- 局所要素座標系(x、yおよびz)

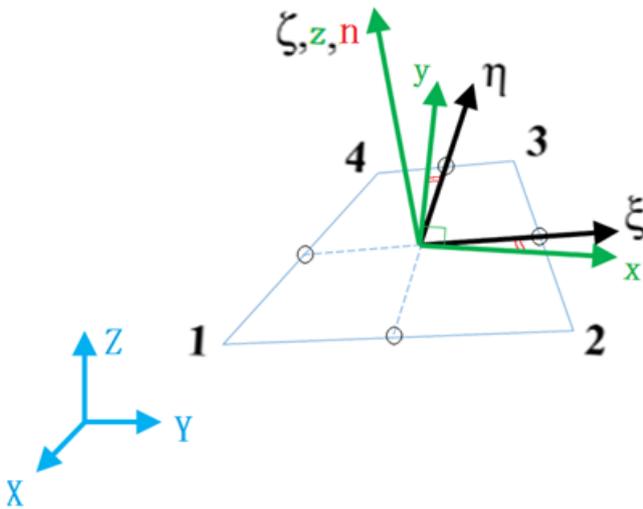


図 105: 4節点シェル要素

(**X**, **Y**および**Z**) - 全体デカルト固定座標系:

(ξ , η , ζ) - 固有座標系(非正規化座標系)

- ξ は、ライン14の中点からライン23の中点に向かいます。
- η は、ライン12の中点からライン34の中点に向かいます。
- 平面(ξ , η)はシェル要素の中立面内にあり、 ζ は中立面に垂直です。

(**x**, **y**, および**z**) - 局所座標系(直交、非正規化要素座標系):

- **z** は中立面に垂直です。
- (**x**および**y**)は中立面内にあります。
- **x** と**y**は、右記の間が同じ角度になるように配置されます; **x**と ξ 、**y**と η

(ξ , η , ζ)と(**x**, **y**および**z**)の原点は同じで、中点を結んだ線の交点になります。

3節点シェル要素

(**X**, **Y**および**Z**) - 全体デカルト固定座標系:

(ξ , η , ζ) - 固有座標系(非正規化座標系)

- ξ は節点1から節点2に向かいます。
- η は節点1から節点3に向かいます。
- 平面(ξ , η)はシェル要素の中立面内にあり、 ζ は中立面に垂直です。

(**x**, **y**, および**z**) - 局所座標系(直交、非正規化要素座標系):

- **z** は中立面に垂直です。
- **x** は節点1から節点2に向かいます。
- **y** は**x**に直交し、(**x**および**y**)は中立面内にあります。

(ξ , η , ζ)と(**x**, **y**および**z**)の原点は同じで、節点1になります。

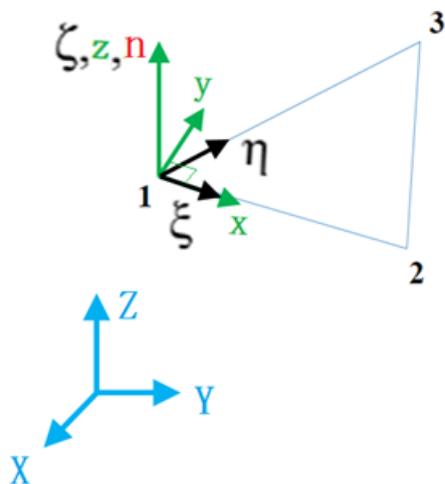


図 106:

ソリッドおよび厚肉シェル(ヘキサ)

- 全体座標系 (X , Y および Z)
- 固有座標系 (r , s および t)
- 局所要素座標系 (x , y および z)
- 材料座標系

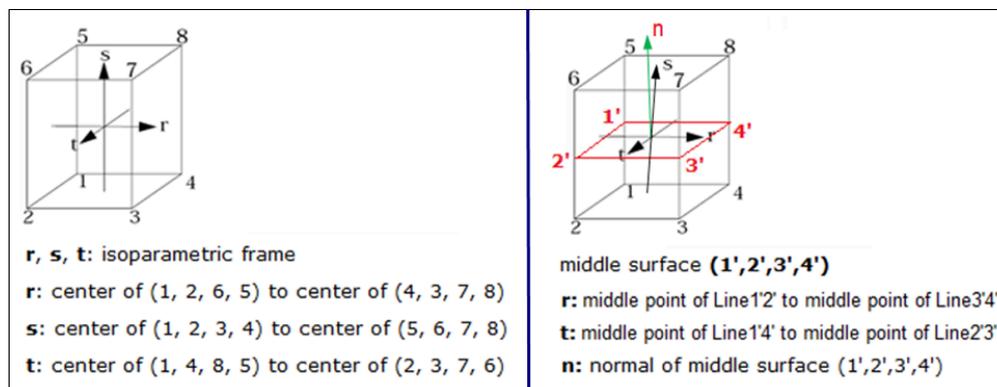


図 107: ソリッドおよび厚肉シェル(ヘキサ)

(X , Y および Z)- 全体デカルト固定座標系:

(r , s および t)- 固有座標系(非正規化座標系)。

- r は、サーフェス(1, 2, 6, 5)の中心からサーフェス(4, 3, 7, 8)の中心に向かいます。
- s は、サーフェス(1, 2, 3, 4)の中心からサーフェス(5, 6, 7, 8)の中心に向かいます。
- t は、サーフェス(1, 4, 8, 5)の中心からサーフェス(2, 3, 7, 6)の中心に向かいます。

平面(r , t)もまた、中立面(1', 2', 3', 4')内にあります。

- r も、線1'と2'の midpoint から線3'と4'の midpoint に向かいます。
- t も、線1'と2'の midpoint から線3'と4'の midpoint に向かいます。
- n は中立面(1', 2', 3', 4')に垂直です。

(x , y , および z) - 局所座標系(直交、非正規化要素座標系):

中立面(1', 2', 3', 4')内の局所座標系は、シェル要素の中立面(1, 2, 3, 4)と同じです。ソリッド内の ζ はシェル要素内のと同じです。

テトラ要素

(r , s および t)- 固有座標系(非正規化座標系)。

- r は節点4から節点1に向かいます。
- s は節点4から節点2に向かいます。
- t は節点4から節点3に向かいます。

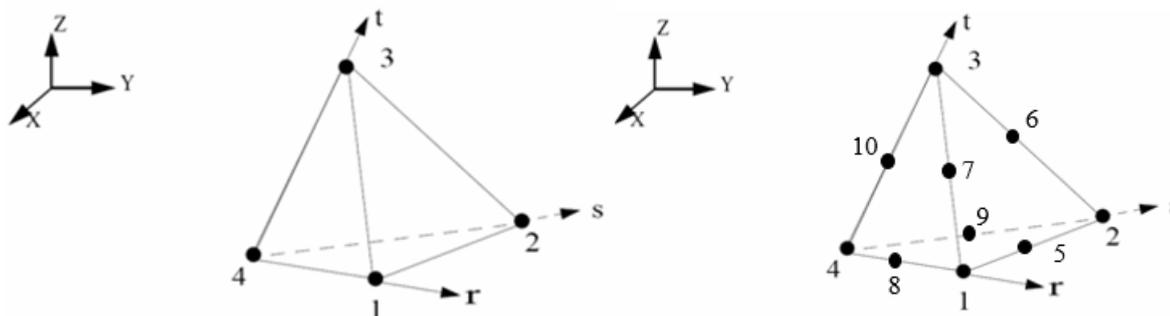


図 108: テトラ要素

材料座標系

シェル要素では、異方性を記述する材料座標系を使用して、プロパティタイプ9、10、11、16、17、および19により異方性を定義できます。材料座標系の定義には、ベクトル V と角 ϕ が必要です(下の/PROP/TYPE9フォーマットをご参照ください)。材料方向($m1$ and $m2$)は、さまざまな力学的特性(例: ヤング率 E 、せん断係数、応力-ひずみ挙動、損傷など)の方向を表します。

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
V_x		V_y		V_z		ϕ			

ベクトル V と角 ϕ を使用して、材料方向1($m1$)を定義できます(法線 n に沿ってベクトル V を中立面に投影するとベクトル V' を取得できます。ベクトル V' を角 ϕ だけ回転させると、材料方向 $m1$ を取得できます。材料方向 $m1$ は通常、繊維方向です。複合材の場合は、1つのベクトル V と別の ϕ により、別のプライを定義することができます)。

2番目の材料軸 $m2$ は $m1$ に垂直です(/PROP/TYPE16を除き、 $m1$ と $m2$ の間の角は α で適宜できます)。

- n はシェルの中立面に垂直です。

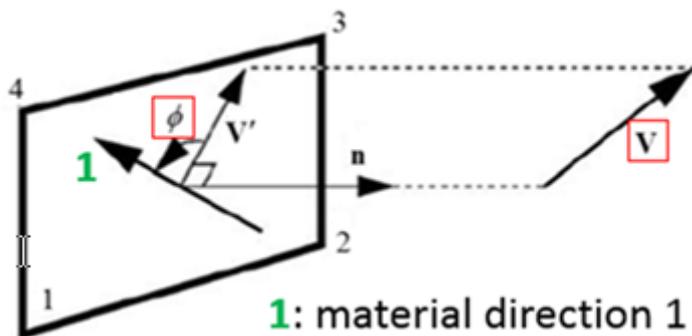


図 109:

/PROP/TYPE11では、 $I_{orth}ORTH$ により材料座標系の相対方向を定義できます。

- $I_{orth}ORTH=0$ (デフォルト): 直交異方性方向は局所共回転基準に従います。 x と $m1$ の間の角はシミュレーションの間一定です。局所フレームで内力が計算され、全体座標系に回転されます。この定式化は、大きな回転が発生すると、より正確になります。
- $I_{orth}ORTH=1$: 直交異方性方向は局所アイソパラメトリックフレームに付加されます。 ζ と $m1$ の間の角は、シミュレーション中に更新されます。これは、ベクトル $m1$ の ζ と η への投影がシミュレーションの間、常に一定となるように更新されます。純せん断はこの方法ではよく表されませんが、引張りは良好に表現されます。したがって、この方法は通常、エアバッグの繊維方向を定義するために使用されます。

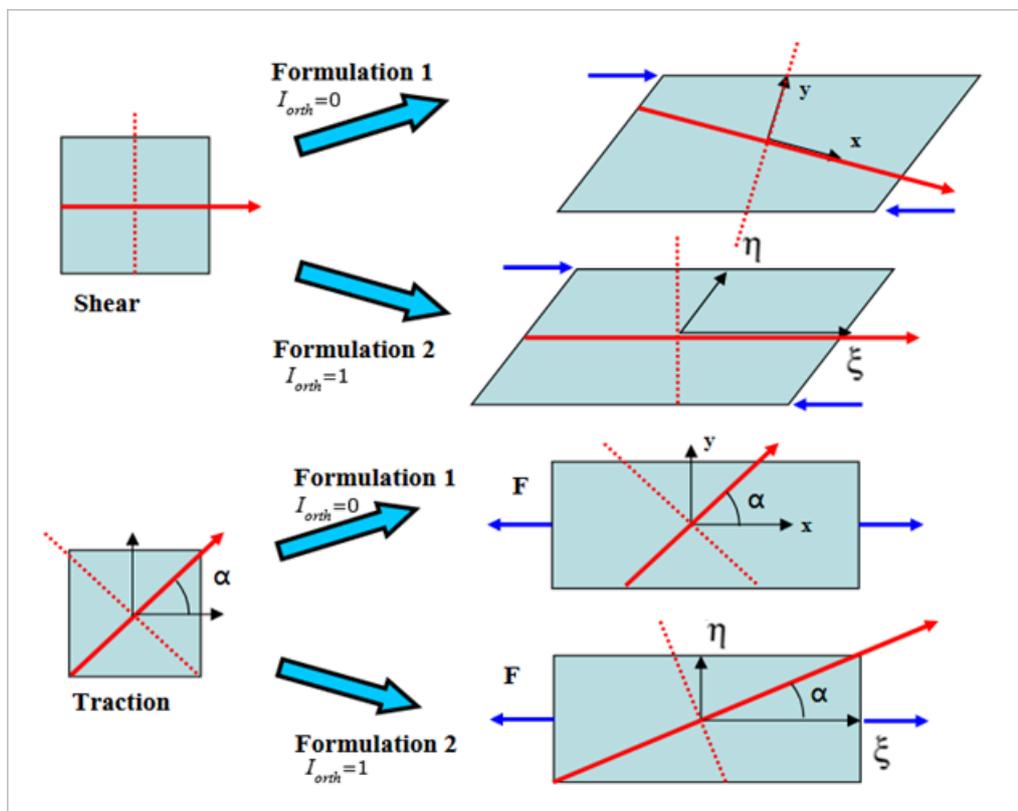


図 110:

3次元ソリッドおよび厚肉シェル要素の場合、同じプロセスを使用してシェル要素と同様に材料方向と直交異方性方向 ($I_{orth}ORTH$) を決定します。/PROP/TYP6(SOL_ORTH)では、オプション I_pP を使用して基準面を決定します。

$I_pP=0$	Skew_IDを使用
$I_pP=1$	平面(r,s) + a角 ϕ
$I_pP=2$	平面(s,t) + a角 ϕ
$I_pP=3$	平面(t,r) + a角 ϕ
$I_pP=11$	平面(r,s) + 参照ベクトルVの平面(r,s)上の直交投影
$I_pP=12$	平面(s,t) + 参照ベクトルVの平面(s,t)上の直交投影
$I_pP=13$	平面(t,r) + 参照ベクトルVの平面(t,r)上の直交投影

- 任意の $I_{solid}SOLID$ と $I_{frame}FRAME$ パラメータで、定義は同じです。
- 最も単純なケースでは、直接スキュー($I_pP=0$)を使用した材料方向 $m1$ 、 $m2$ 、および $m3$ が推奨されます。
- $I_pP > 0$ の場合は、アイソパラメトリック非直交座標系 r 、 s 、および t を使用して材料方向を決定します。
 - 最初の材料軸 $m1$ は、 I_pP に従って決定されます。
 - 例えば、 $I_pP=1$ の場合
 - 最初の材料軸 $m1$ および $m2$ は直交し、(r' および s')面で角 ϕ だけ回転されます。
 - 3つ目の材料軸 $m3$ は、 $m1$ および $m2$ 面に垂直です($m1$ と $m2$ のベクトル積)。

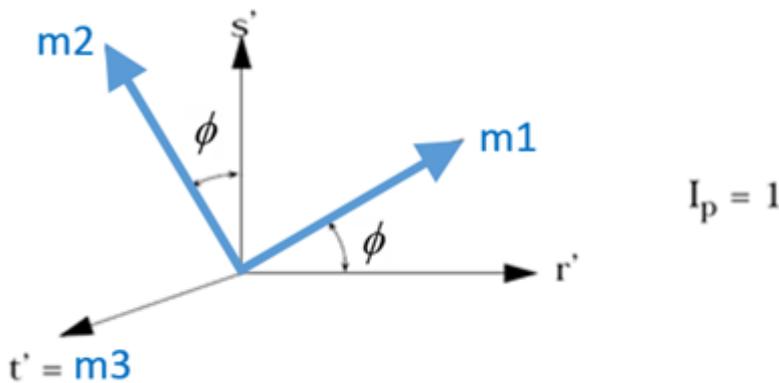


図 111:

- (r' 、 s' および t')座標系は直交座標系で、非直交アイソパラメトリック座標系(r 、 s および t)から生成されます。

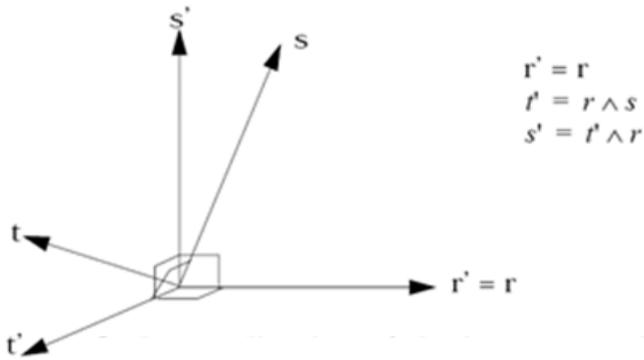


図 112: アイソパラメトリック座標系の直交化

$I_{solid}SOLID$ および $I_{frame}FRAME$ パラメータに応じて、/PROP/TYPE6 (SO1_ORTH)を使用してRadiossでヘキサ要素 (8節点3次元ソリッド)に対して3つの座標系定義が使用されます。

全体座標系定義

- 定義1: ソリッド、 $I_{solid}SOLID=1, 2, 17 + I_{frame}FRAME=0, 1$ (デフォルト)
全体座標系が使用され、要素座標系 (非共回転定式化) は使用できません。

要素座標系定義

- 定義2: ソリッド、 $I_{solid}SOLID=1, 2, 17 + I_{frame}FRAME=2$
要素座標系 ($I_{frame}FRAME=2$ 共回転定式化) が使用されます。
- 定義3: ソリッド、 $I_{solid}SOLID=14$ または 24
 $I_{frame}FRAME$ パラメータによる影響はありません。要素座標系が使用され、共回転定式化はすでに定義されています。

注: 共回転定式化が使用される場合、直交異方性フレーム ($I_{orth}ORTH$ により定義される) は局所 (共回転) フレームと同じ方向を保つため、このフレームも共回転となります。

モデル化のツール

スキューとフレーム (/SKEW & /FRAME)

スキューとフレームは局所座標の定義に用いられます。

これらの方向は以下の適用に用いることが可能です：

- 境界条件
- 集中荷重
- 強制速度

以下の定義に用いることが可能です：

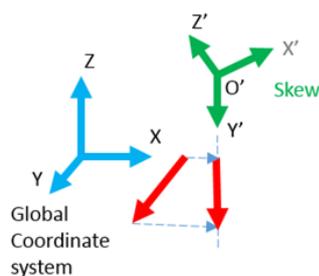
- 剛結の向き
- 剛体に付加される慣性フレーム
- 一般スプリング参照フレーム
- ビームタイプスプリング初期参照フレーム
- 節点時刻歴出力フレーム

2つの参照定義がRadiossで可能です：

スキュー参照

これは全体座標系に関して局所座標系の諸量を定義する投影参照です。実際、スキューの原点は、移動スキューが定義された場合でもその移動の間最初の位置に留まります。この場合では、運動学的な諸量の計算の参照で、単純な投影マトリックスが用いられます。

図 113では、強制速度がY方向に適用されます。/IMPVELでは、スキューが使用されます。そこで、強制速度は全体座標系のY軸で計算された後、局所スキュー参照のY'軸上に投影されます。



```

#-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8-----9-----10-----
/skew/FIX/2
example
#
#          OX          OY          OZ          O'
#          10          10          10          10          O'(10,10,10)
#          X1          Y1          Z1          Y'
#          11          11          11          10          Y'(11,11,10)
#          X2          Y2          Z2          Z'
#          10          11          11          11          Z'(10,11,11)
#-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8-----9-----10-----
/IMPVEL/1
example
#funcnt_IDT  Dir  skew_ID sensor_ID  qrnod_ID  frame_ID  Icoor
#          999   Y      2      0      9      0      0
#          Ascale_x  Fscale_Y  Tstart  Tstop
#          0          0          0          0
#-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8-----9-----10-----

```

図 113: スキューの例

フレーム参照

これは移動または固定参照です。諸量は移動する参照フレームまたは参照フレームの種類に依存しないその原点に関して計算されます。移動参照フレームでは、その参照の位置と向きは、移動の間、時間で変化します。節点位置で定義されたそのフレームの原点は節点に結びつけられています。

フレームは相対的な移動を測定しますが、スキューは全体的な移動を測定してそれをスキューに投影します。強制速度などいくつかのオプションでのみフレームを使用し、TH/NODEなどではスキューを使用します。

図 114では、回転速度がZ軸周りに適用されます。/LOAD/CENTRIでは、フレームが使用されます。そこで、回転速度は、全体座標系のZ軸ではなく、フレーム参照のZ'軸周りに適用されます。

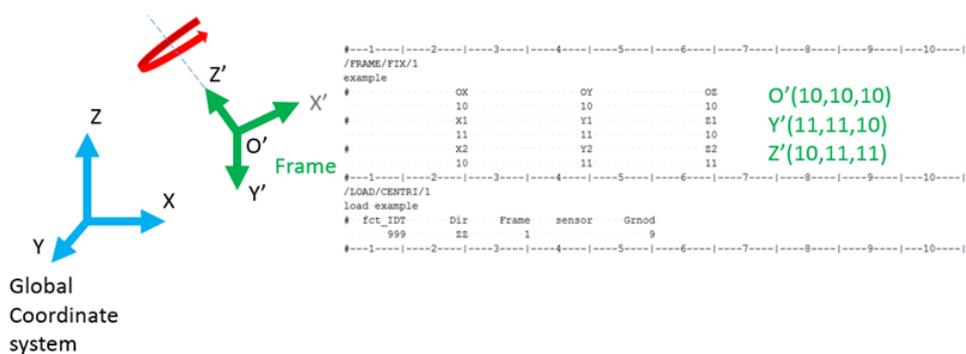


図 114: フレームの例

断面 (/SECT)

断面を使用して、一群の要素と節点を通過する力、モーメント、エネルギーを測定します。断面の変位をファイルに保存しておき、より小型の断面モデルに適用する変位として使用できます。

断面を定義するには、以下が必要です：

- 節点のグループと要素のグループ。節点と要素は /SECT でユーザーが選択できます。 *frame_ID*、 /SECT/PARAL、または /SECT/CIRCLE で /SECT を使用して切断面を定義することにより、節点と要素を自動的に選択することもできます。
- 3つの節点を選択することで定義した局所出力座標系
- 力とモーメントを計算するための参照点

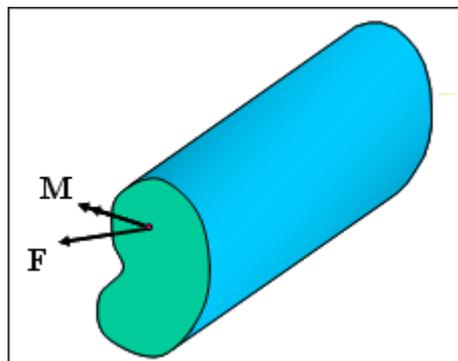


図 115: 向きのあるソリッドのための断面定義

切断面

/SECT では、切断面は無限大の大きさを持ち、要素のグループと節点のグループの単位で定義します。これらの要素と節点はユーザー定義であり、可能であれば1列に配置します。

要素断面の一方の側にあるすべての節点を選択することをお勧めします。

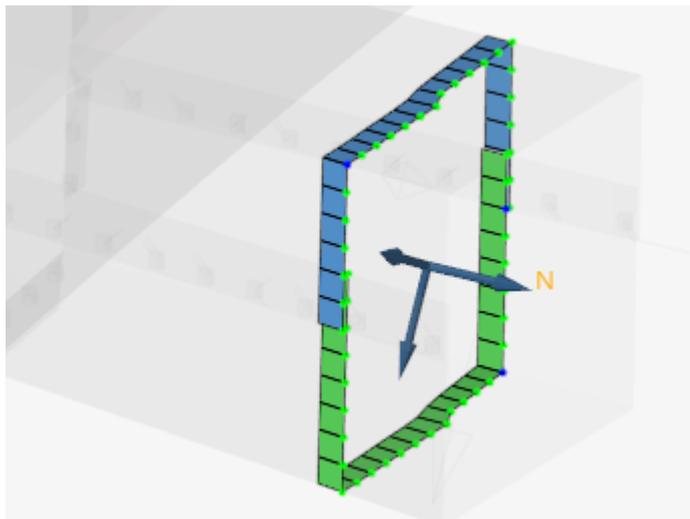


図 116: 手動で選択した要素と節点

局所座標系を使用して切断面を定義することもできます。切断面上で3つの節点を選択することで局所座標系 /FRAME/ MOVを定義します。この場合は、断面の領域にあるすべての要素が要素グループに属し、/SECTの節点グループは使用しません。局所座標系のxy平面上にある節点と要素が、断面の計算で使用するよう自動的に選択されます。局所座標系のxy平面が切断面になります。

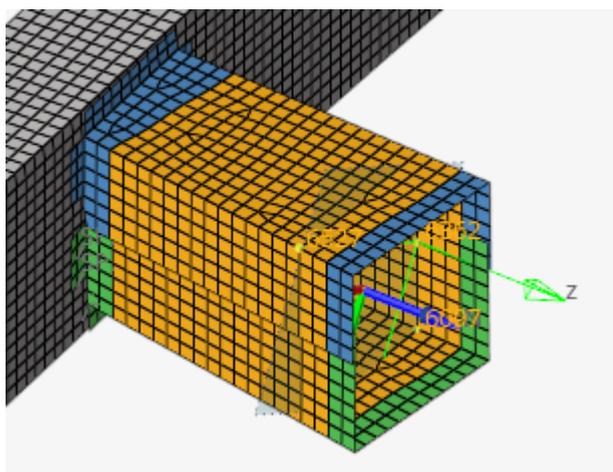


図 117: 局所座標系を使用して定義した切断面に対して定義した要素グループ(オレンジ色)

これにより、断面上にある節点と要素がStarter出力ファイルに出力されます。

NUMBER OF NODES										40
NODES:										
6062	6064	6055	6074	6076	5895	6078	6173	6166	6136	
6174	6181	6182	6219	6210	6220	6227	6228	6359	6358	
...										
NUMBER OF SHELL ELEMENTS										43
SHELL	N1	N2	N3	N4						
5819	0	1	1	0						
5820	0	1	1	0						
5826	0	0	1	0						
5839	0	1	1	0						
...										

/SECT/PARALでは、平行四辺形の2辺を定義する3つの点M、M1、M2で切断平行四辺形が定義されます。切断平行四辺形の領域にあるすべての要素は、定義した断面にある要素グループに属する必要があります。これまで/SECTで説明

したように、局所座標系を使用している場合は、断面の計算に使用した節点と要素が自動的に選択され、Starter出力ファイルに出力されます。

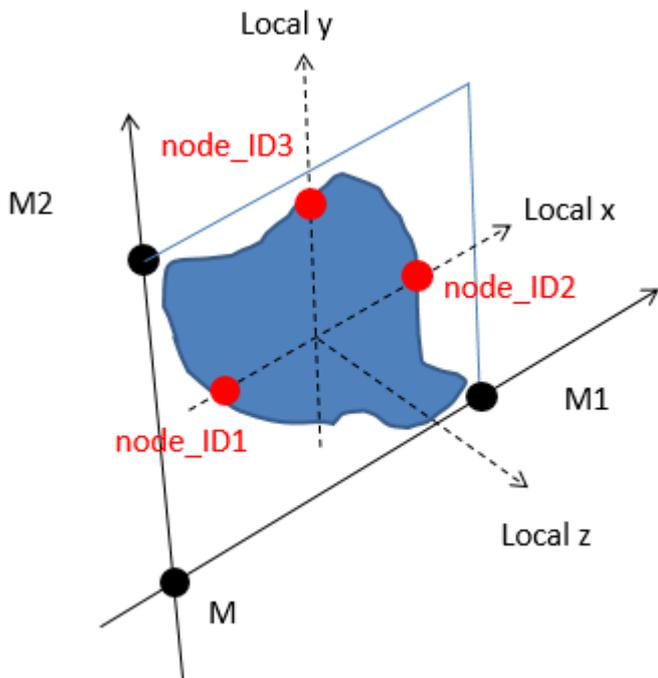


図 118: /SECT/PARALの定義

/SECT/CIRCLEでは、切断ディスクは点M、半径、および法線ベクトルで定義されます。この円形断面の領域にあるすべての要素は、定義した断面にある要素グループに属する必要があります。これまで説明したように、断面の計算に使用した節点と要素が自動的に選択され、Starter出力ファイルに出力されます。

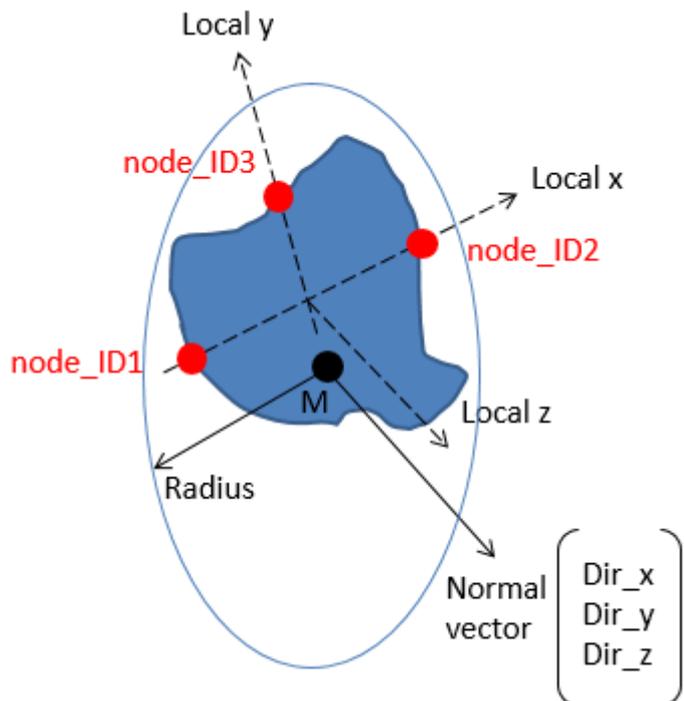


図 119: /SECT/CIRCLEの定義

どのタイプの断面でも、ソリッド、シェル、トラス、ビーム、スプリングの各要素を切断できます。接触インターフェースも選択できます。

`frame_ID`、`/SECT/PARAL`、または`/SECT/CIRCLE`で`/SECT`を使用している場合、断面の計算に使用される節点は、選択した要素の+z側に存在します。これらの節点は自動的に定義されるので、要素グループをパート単位で定義できます。したがって、各パートを再メッシュしていれば要素グループを再定義する必要はありません。

切断面の局所座標系

断面の力とモーメントを計算するには局所座標系を定義する必要があります。

断面タイプが3種類(`/SECT`、`/SECT/PARAL`、および`/SECT/CIRCLE`)のどれであっても、3つの節点を選択して、断面出力に使用する局所座標系を定義する必要があります。この3つの節点は断面の平面上にある節点なので、その位置は断面の移動に伴って更新されます。節点`node_ID1`、`node_ID2`、および`node_ID3`によって局所座標系が次のように定義されます。

- 節点の`node_ID1`と`node_ID2`は断面の局所X軸を定義します。
- 節点の`node_ID1`、`node_ID2`、`node_ID3`は断面の局所xy平面を定義します。
- 局所座標系のy軸は、`node_ID3`を局所座標系のx軸に対して直角に投影することによって定義します。
- これにより、局所座標系のx軸とy軸の交点が、その局所座標系の原点になります。
- xy平面に直交する断面法線が局所座標系のz軸になります。

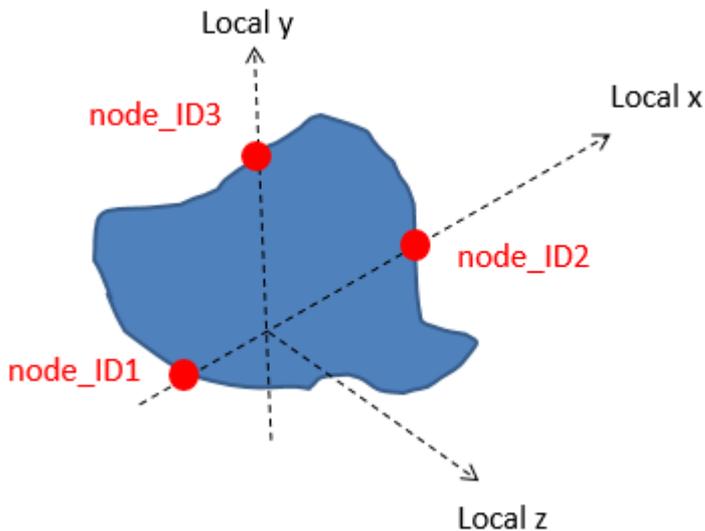


図 120: 節点を使用して定義した、断面の局所座標系

HyperMeshで`/SECT`を作成すると、この3節点が自動的に選択されます。この3節点を手動で選択する場合は、断面の計算に使用する節点のグループに属する節点を選択することをお勧めします。これにより、断面の変形に伴って移動する局所座標系とすることができます。

また、`/SECT`を使用していて3節点を定義せず、`frame_ID`を定義している場合は、`/FRAME/MOV`のxy平面が局所座標系として使用されます。`/FRAME/MOV`を定義している場合は、断面の計算に使用する節点のグループに属する節点を使用することをお勧めします。

力とモーメントの計算

断面力は、選択した要素にかかる節点力の合計です。

$$F = \sum f_i \quad (47)$$

断面の法線方向の力FNは、断面力の法線方向成分、断面の接線方向の力FTは、断面力の切断面での成分です。

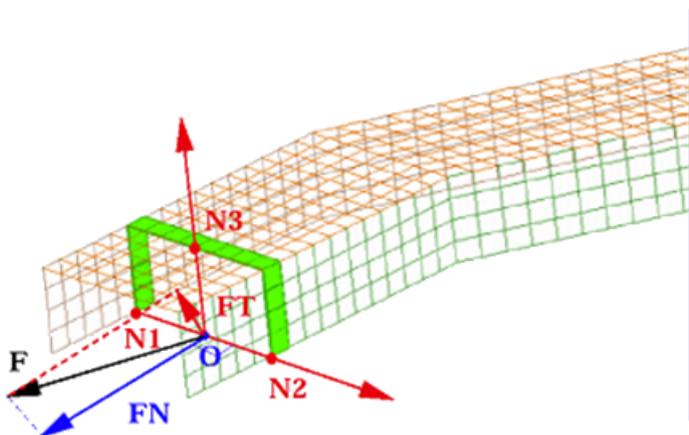


図 121: 断面での法線方向断面力と接線方向断面力

断面モーメントは、選択した要素にかかる節点力の合計に局所座標系の中心までの距離を乗算した値です。

$$M = \sum m_i + \sum ON_i \times f_i \quad (48)$$

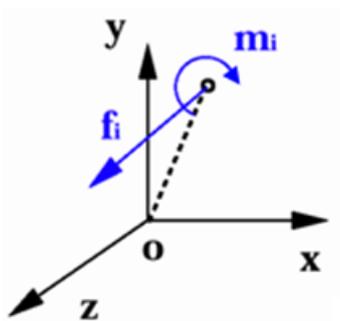


図 122: 節点の合力とモーメント

モーメントは、パラメータ I_{frame} FRAME で定義した断面中心を基準として計算します。出力座標系の中心に関するオプションには、局所座標系の原点、幾何学的中心、重心、全体座標系の原点があります。局所座標系と全体座標系のどちらも出力座標系として使用できます。

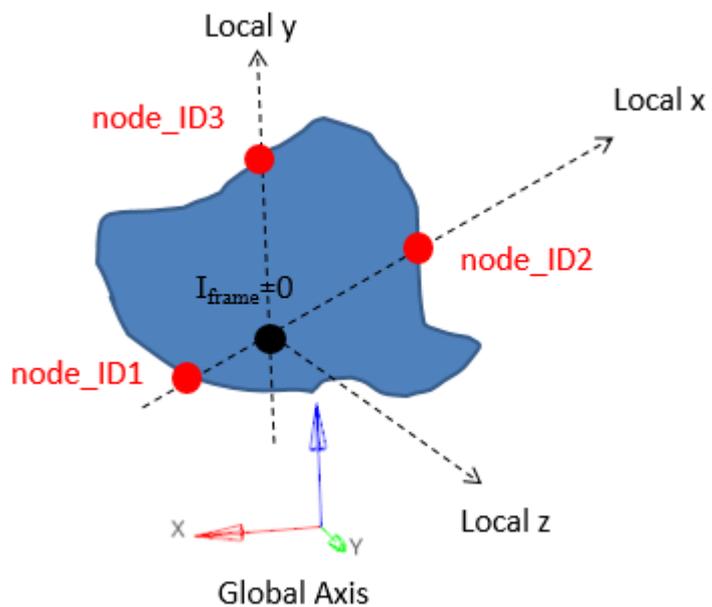


図 123: $I_{frame}FRAME=0$: 断面出力に使用する局所座標系と原点

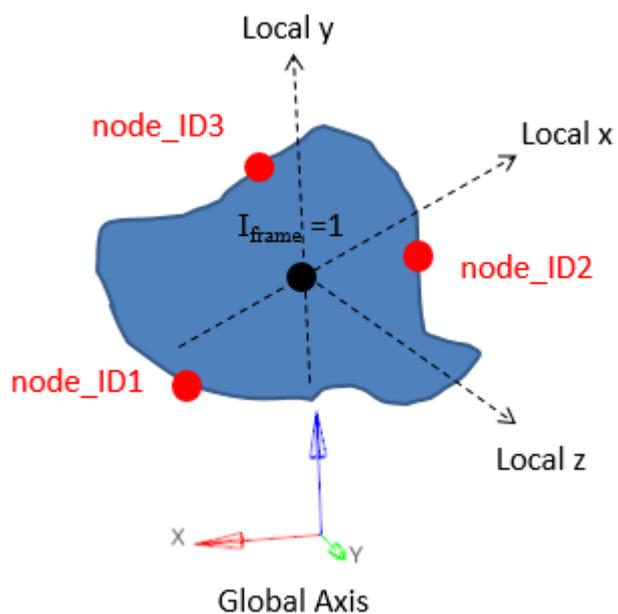


図 124: $I_{frame}FRAME=1$: 断面の幾何学的中心を原点とする局所座標系

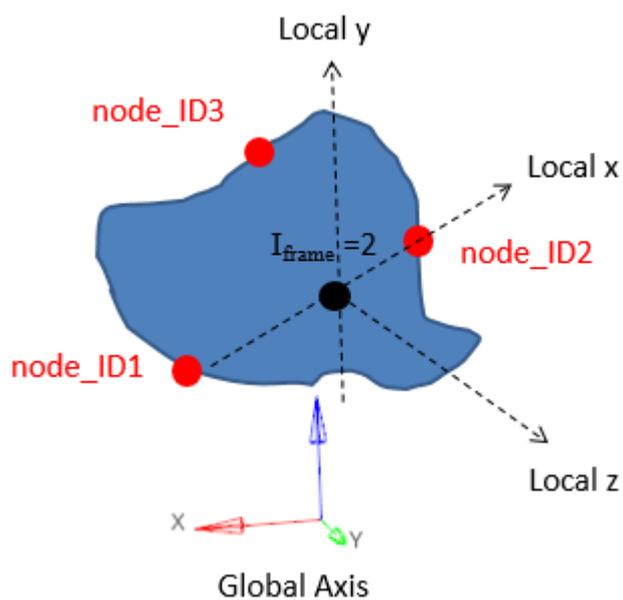


図 125: $I_{frame}FRAME=2$: 断面の重心を原点とする局所座標系

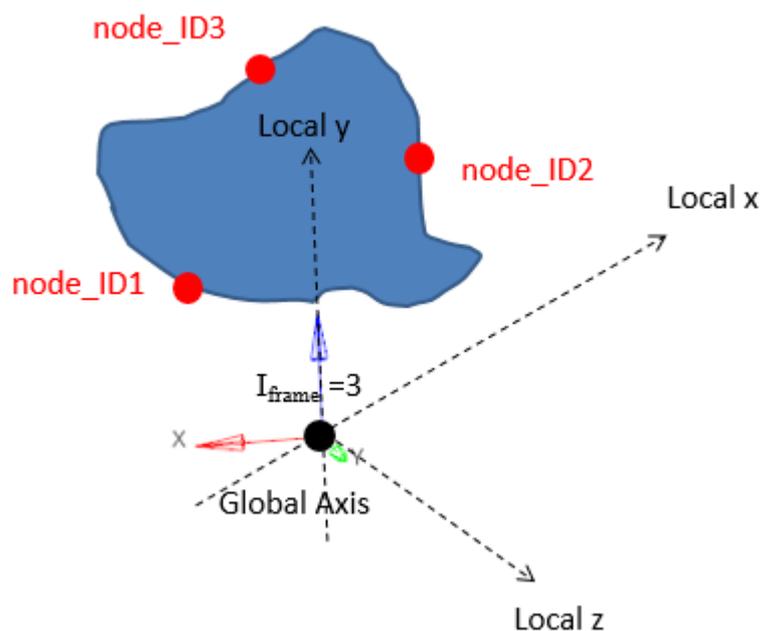


図 126: $I_{frame}FRAME=3$: 中心を全体座標系の原点とする局所座標系

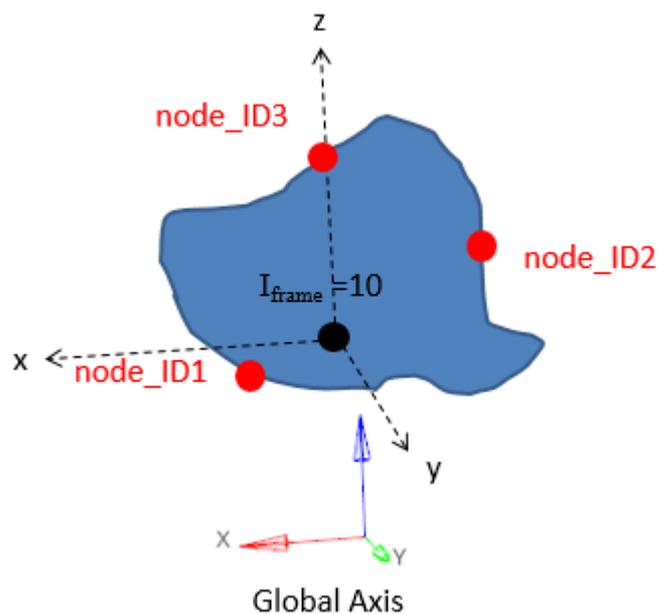


図 127: $I_{frame}FRAME=10$: 局所座標系の原点を中心とする全体座標系

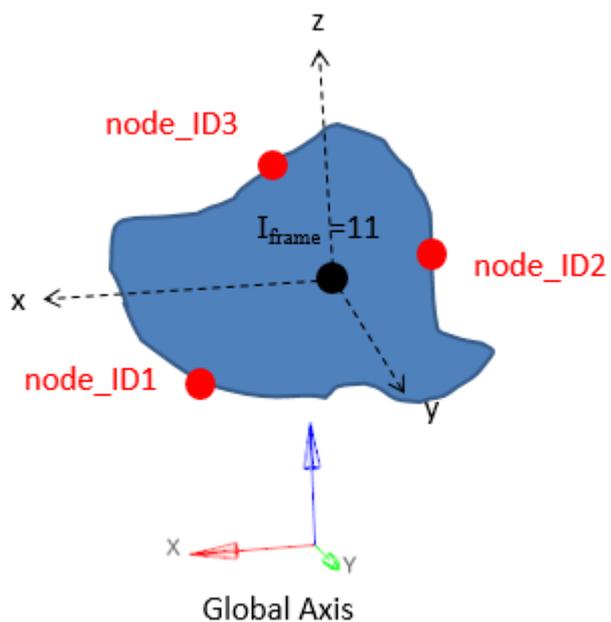


図 128: $I_{frame}FRAME=11$: 断面の幾何学的中心を原点とする全体座標系

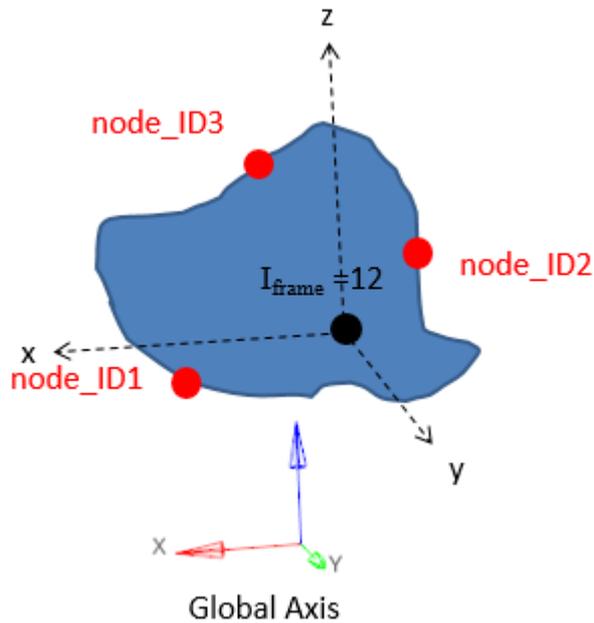


図 129: $I_{frame}FRAME=12$: 断面の重心を原点とする全体座標系

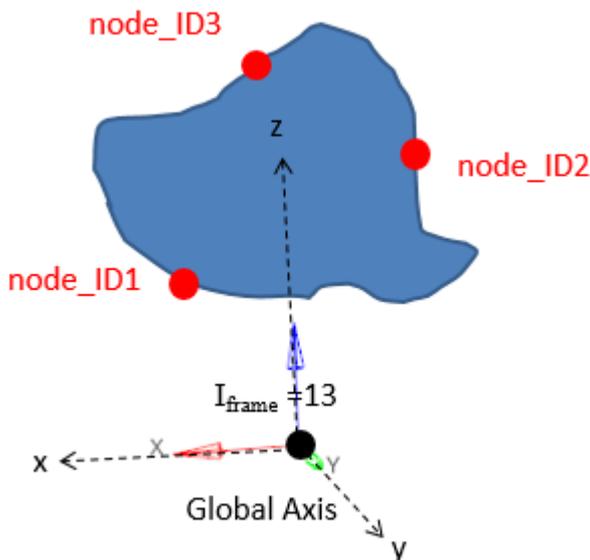


図 130: $I_{frame}FRAME=13$: 中心を全体座標系の原点とする全体座標系

断面の出力

2種類の断面出力を使用できます。

そのひとつは、断面に作用する力とモーメントの合計で構成する時間暦出力/TH/SECTIONです。この出力は、広く使用されている出力を変数グループGLOBAL、LOCAL、およびCENTERとして、全体座標系と局所座標系のどちらでも記述できます。

もうひとつは、断面で各節点が見せる変位、および必要に応じて力とモーメントを、SC01ファイルに書き込んだ断面出力です。このファイルを、適用する変位として別の切断面モデルに取り取ります。RD-E:5400 カット手法 は、使用できる切断

面手法の一例です。この例では、 $I_{SAVE}=1$ または 2 を指定してフルモデルを実行し、変位および必要に応じて合成断面力とモーメントをファイルfile_nameSC01に保存します。

つづいて、 $I_{SAVE}=100$ または 101 を使用して定義した断面で別のカットモデル(サブモデル)を作成し、断面ファイルの節点の変位を読み取ります。 $node_ID_1$ 、 $node_ID_2$ 、および $node_ID_3$ の3節点または $frame_ID$ によって断面に定義した局所座標系は、データの保存($I_{SAVE}=1$ または 2)およびデータの読み取り($I_{SAVE}=100$ または 101)で使用した座標系と同じであることが必要です。

フルモデルで $I_{SAVE}=2$ を使用し、カットモデルで $I_{SAVE}=101$ を使用している場合、フルモデルとカットモデルとの間で、断面(/TH/SECTIO)での合成断面力とモーメントに見られる差異がRadiossによって出力されます。

カットモデル手法が不要であれば、解に要する時間を短縮し、メモリ消費量を削減するために、 $I_{SAVE}=0$ の設定をお勧めします。

フィルター

変位を読み取って切断面モデルに適用する場合は、指数移動平均フィルターを使用して、その変位をフィルター処理できます。たとえば、x方向の変位をフィルター処理するには次のように指定します。

$$x_f = \alpha x(t) + (1 - \alpha)x(t - dt) \quad (49)$$

ここで、

x_f	フィルター処理対象の変位
α	指数移動平均フィルター処理の定数
$x(t)$	フィルター処理前の現在の変位
$x(t - dt)$	前の時間ステップにおける変位

推奨の処理は次のとおりです。

$$\alpha = \frac{2\pi dt}{T} : -3\text{dBフィルター処理}$$

$$\alpha = \frac{2\pi dt}{\sqrt{3}T} : -6\text{dBフィルター処理}$$

ここで、

T	フィルター処理周期
dt	モデルの時間ステップ

-3dBフィルターの場合は、多くの場合、フィルター処理周期 $T = 10\Delta t$ 、 $\alpha = \frac{2\pi}{10} = 0.62832$ を使用します。

材料

異なる材料試験では、結果として得られる材料の力学的特性が異なる場合があります。

一般的な金属の材料試験は引張り試験です。この試験の応力-ひずみ曲線では、材料の降伏点、ネッキングポイント、および破壊点を確認することができます。

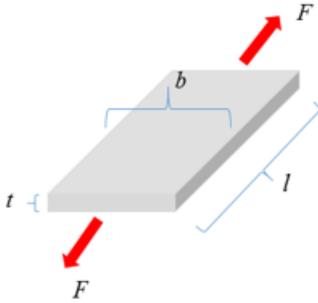


図 131: 力(F)および長さ(l)が測定される

工学応力-ひずみ曲線は、以下によって生成できます:

$$\sigma_e = \frac{F}{S_0} \quad (50)$$

$$\varepsilon_e = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (51)$$

ここで、

S_0 初期状態における断面積

l_0 初期長さ

力-伸び曲線または工学応力-ひずみ曲線では、3つのポイントが重要です。

1. 降伏点: 材料が降伏し始めるポイント。降伏前の材料は弾性状態(ヤング率Eを測定できる)、降伏後は不可逆的な塑性ひずみの状態にあるとみなすことができます。
 - この試験の一部の材料は、まず上降伏点(R_{eH})に達してから、下降伏点(R_{eL})まで下がります。工学応力-ひずみ曲線では、下降伏応力(保守的値)を取得できます。
 - 材料によっては、降伏点を容易に見つけることができない場合もあります。降伏応力として塑性ひずみの0.1または0.2%の応力を指定します。
2. ネッキングポイント: 材料が工学応力-ひずみ曲線の最大応力に達したポイント。このポイントを過ぎると、材料は軟化し始めます。
3. 破壊点: 材料が破壊されるポイント。

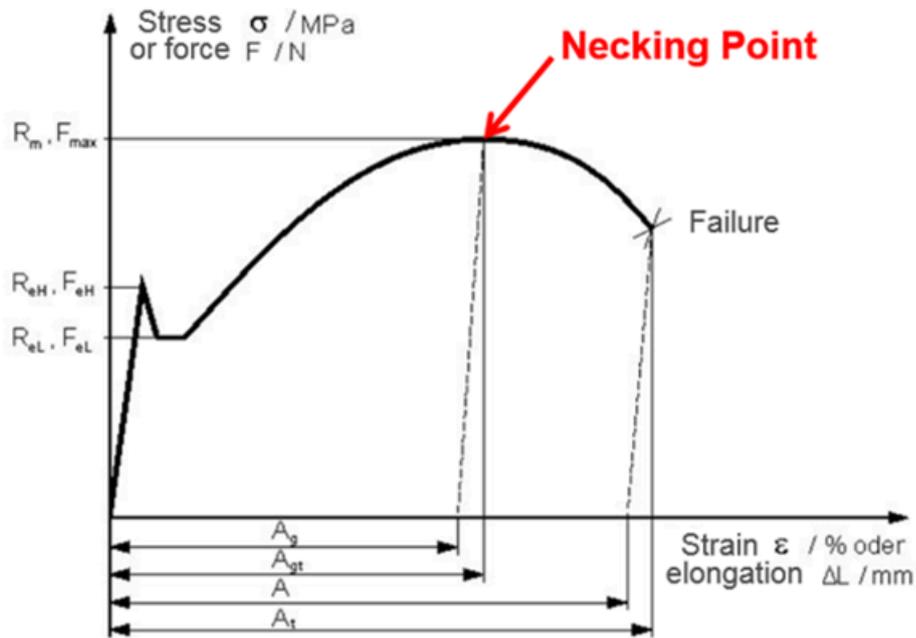


図 132:

R_m	最大抵抗
F_{max}	最大力
R_{eH}	上降伏レベル
R_{eL}	下降伏レベル
A_g	均一の伸び
A_{gt}	均一の伸びの合計
A_t	全破壊ひずみ

Radiossのほとんどの材料で要求される真の応力-ひずみ曲線。ただし、工学応力-ひずみと真応力-ひずみの両方で材料データを入力できるLAW2は除きます。

図 133で、工学応力-ひずみ曲線(青色)は以下を使用して求めます:

$$\sigma_{tr} = \sigma_e \exp(\epsilon_{tr}) \tag{52}$$

$$\epsilon_{tr} = \ln(1 + \epsilon_e) \tag{53}$$

この結果は真応力-ひずみ曲線(赤色)になります。緑色で示されている塑性真応力-ひずみ曲線は、塑性ひずみが0から始まります。LAW36、LAW60、LAW63などで必要とされるのは、この緑色の塑性真応力-ひずみ曲線です。

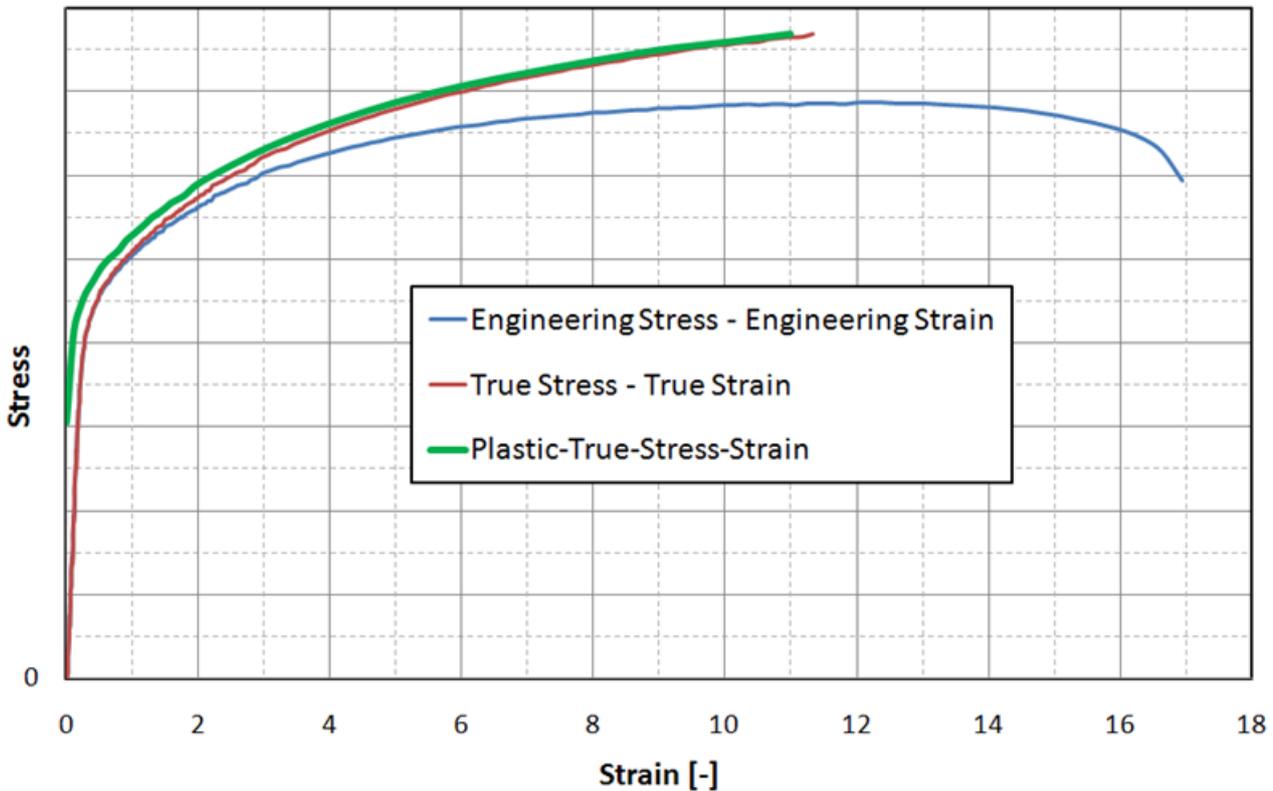


図 133:

真応力-ひずみ曲線は、材料のネッキングポイントまで有効です。ネッキングポイント以降は、硬化について、材料曲線を手動で定義する必要があります。別の材料則を使用することで、Radiossでは真応力-ひずみ曲線を100%外挿することができます。

- 線形外挿: 応力-ひずみ曲線が関数入力(LAW36)の場合は、曲線の最後の2点によって定義される傾きによって線形的に外挿されます。横軸値を、前の横軸値より大きな値になるようにリストすることをお勧めします。
- Johnson-Cook: Johnson-Cook硬化は、真応力-ひずみ曲線の外挿に用いられる最も一般的な1つです。

$$\sigma_y = a + b\varepsilon_p^n \quad (54)$$

しかしながら、自動車のスチールについてはひずみ硬化を過大に見積もることがあり、このケースではSwift-Voceがより精確です。

- SwiftおよびVoce: ネッキングポイント以降は、次のいずれかの方程式を使用して真応力-ひずみ曲線を外挿します。

Swiftモデル

$$\sigma_y = A(\bar{\varepsilon}_p + \varepsilon_0)^n$$

A と n は正です。

Voceモデル

$$\sigma_y = k_0 + Q[1 - \exp(-B\bar{\varepsilon}_p)]$$

k_0 、 Q および B は正です。

SwiftとVoceの組み合わせモデル
(LAW84およびLAW87)

$$\sigma_y = \alpha \underbrace{[A(\bar{\varepsilon}_p + \varepsilon_0)^n]}_{\text{Swift hardening}} + (1 - \alpha) \underbrace{\{k_0 + Q[1 - \exp(-B\bar{\varepsilon}_p)]\}}_{\text{Voce hardening}}$$

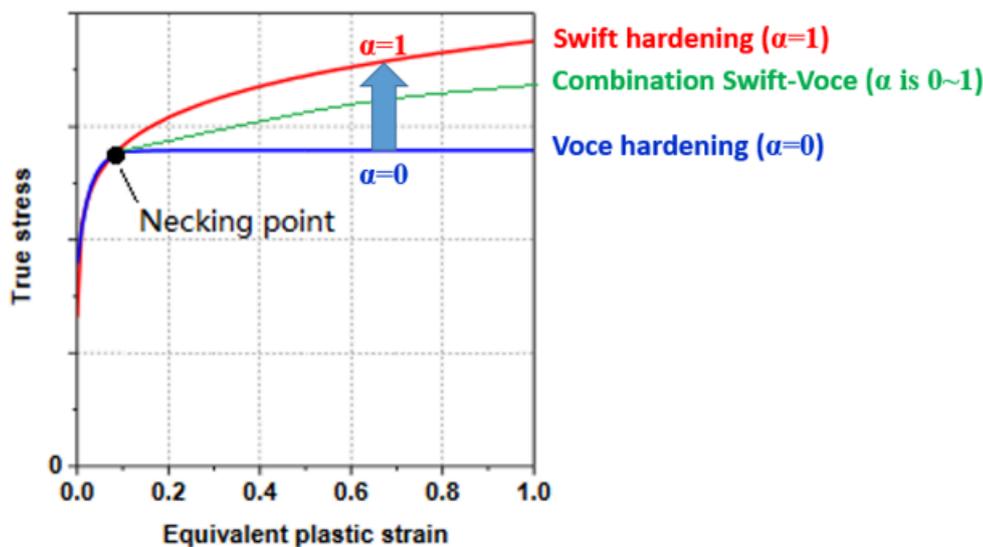


図 134:

ここで、 α はSwift硬化とVoce硬化の重量。Swift硬化パラメータ A 、 ϵ_0 、 n およびVoce硬化パラメータ k_0 、 Q 、 B と入力応力-ひずみ曲線をフィットさせるためのComposeスクリプトの例を示します。

See Also

[/MAT/LAW84 \(Starter\)](#)

[/MAT/LAW87 \(BARLAT2000\) \(Starter\)](#)

超弾性材料

超弾性材料は、非常に大きいひずみ下で弾性的に応答する材料をモデル化するために使用されます。これらの材料は通常、除荷されるとその初期状態に戻る、非線形弾性、非圧縮性応力ひずみ応答を示します。

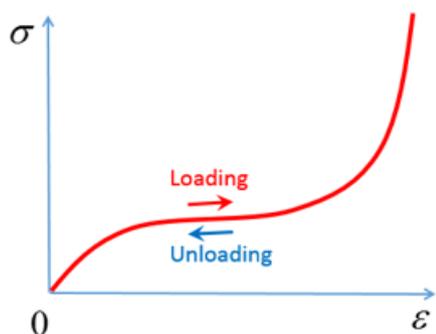


図 135:

超弾性材料は、応力が現在の変形にのみ依存するCauchy材料の特定なケースです。Meyerの運動論は、これらの材料が、変形時に回転し真っ直ぐになるフレキシブルなチェーン状の構造でどのように構成されているかを示しています。これは、ひずみエネルギー密度関数は変形の数として書くことができるという理論を導いています。³ ここでは、ひずみエネルギー密度は微分され、その材料の応力ひずみ挙動が得られます。

最も一般的な超弾性材料は、エラストマーとゴムです。エラストマーの特徴には以下のものがあります：⁴

- 材料はほぼ理想的に弾性で、変形は可逆、応力はその時点でのひずみの唯一の関数で、一定温度で変形または断熱状態である場合、履歴や荷重速度とは無関係です。
- この材料は非圧縮性で、体積の変化に対して強く抵抗します。応力の静水成分に対する体積変化の割合である体積弾性率は、金属のそれに相当します。
- この材料はせん断に非常に弱く、せん断弾性係数はほとんどの金属の 10^{-5} 倍の小ささです。
- この材料は等方性で、応力-ひずみ応答は材料の向きとは無関係です。

要素プロパティの推奨事項

超弾性材料則を使用する際、推奨される要素プロパティの設定があります。ソリッド要素を使用する際は常に、可能であれば8節点/BRICK要素でメッシュすることがより適しています。可能でない場合は、/TETRA4または/TETRA10要素を使用します。8節点ソリッド要素に推奨される/PROP/SOLIDは $I_{smstr}SMSTR=10$ 、 $I_{cpre}CPRE=1$ 、 $I_{solid}SOLID=24$ で、アワグラスが出現する場合は、 $I_{solid}SOLID=17$ と $I_{frame}FRAME=2$ を使用します。

参考文献

Ogden材料

超弾性材料は、ゴム、ポリマーおよび同様の材料の等方性、非線形弾性挙動をモデル化するために使用されます。これらの材料はその挙動においてほぼ非圧縮性で、非常に大きいひずみにストレッチされ得ます。

Radiossでは、材料則LAW42、LAW62、LAW69、LAW82およびLAW88は、超弾性材料のモデル化に、Ogden材料モデルの異なるひずみエネルギー密度関数を活用しています⁵、⁶

材料の定義

ストレッチ(ストレッチ比とも称される) λ は、最終長と初期長の比率で、変形の大きな材料に使用されます。引張における立方体の場合:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l}{l_{01}} \quad \text{方向1の工学ひずみ(公称ひずみとも称される)}$$

$$\lambda_1 = \frac{l_1}{l_{01}} \quad \text{方向1のストレッチ}$$

3. Treloar, L. R. G. "The elasticity and related properties of rubbers." *Reports on progress in physics* 36, no. 7 (1973): 755

4. Bower, Allan F. *Applied mechanics of solids*. CRC press, 2009

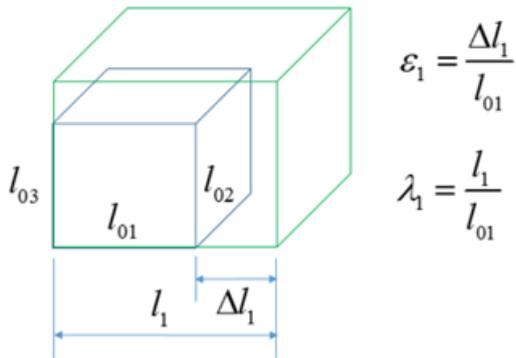


図 136:

したがって、ひずみとストレッチは次のように関連付けられます:

$$\lambda = 1 + \varepsilon \quad (55)$$

主ストレッチ λ_i は相対体積 J の計算により体積変形を表すために使用され、次のように計算されます:

$$J = \frac{V}{V_0} = \frac{l_1 \cdot l_2 \cdot l_3}{l_{01} \cdot l_{02} \cdot l_{03}} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \quad (56)$$

非圧縮性材料の場合、体積は変化しないため、 $J=1$ であり、したがって、ストレッチは以下の材料試験について計算されません。

- 単軸試験:

$$\lambda_1 = \lambda \quad \text{および} \quad \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{\lambda}$$

- 二軸試験:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda \quad \text{および} \quad \lambda_3 = \lambda^{-2}$$

- 平面(せん断)試験

$$\lambda_1 = \lambda; \lambda_3 = 1 \quad \text{および} \quad \lambda_2 = \lambda^{-1}$$

/MAT/LAW42 (OGDEN)

この材料モデルは、Ogden、Neo-Hookean、またはMooney-Rivlin材料モデルを使用して指定された超弾性、粘性、および非圧縮性の材料を定義します。この法則は、通常、非圧縮性のゴム、ポリマー、フォーム、およびエラストマーのモデル化に使用されます。この材料は、シェル要素とソリッド要素に使用できます。

LAW42は、以下のOgden材料モデルのひずみエネルギー密度表現を使用します。

$$W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{p=1}^5 \frac{\mu_p}{\alpha_p} (\bar{\lambda}_{1\alpha_p} + \bar{\lambda}_{2\alpha_p} + \bar{\lambda}_{3\alpha_p} - 3) + \frac{K}{2} (J - 1)^2 \quad (57)$$

ここで、

W ひずみエネルギー密度

λ_i i th主工学ストレッチ

J 相対体積は次のように定義されます: $J = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = \frac{\rho_0}{\rho}$

$\bar{\lambda}_i = J^{-\frac{1}{3}} \lambda_i$ 偏差ストレッチ

α_p および μ_p 材料定数係数ペア。
5つまでの材料定数ペアを定義できます。

初期せん断弾性率 μ および体積弾性率 (K) は、次のように与えられます:

$$\mu = \frac{\sum_{p=1}^5 \mu_p \cdot \alpha_p}{2} \quad (58)$$

および

$$K = \mu \cdot \frac{2(1+\nu)}{3(1-2\nu)} \quad (59)$$

ここで、 ν はポアソン比で、体積弾性率の計算のみに使用されます。

材料パラメータ

パラメータ α_p および μ_p は、初期せん断弾性率が以下となるように選択されなくてはなりません:

$$\mu = \frac{\sum_{p=1}^5 \mu_p \cdot \alpha_p}{2} > 0 \quad (60)$$

材料の安定性のためには、各材料定数ペアが以下のとおりである必要があります:

$$\mu_p \cdot \alpha_p > 0 \quad (61)$$

通常、Ogdenモデルは700%までのひずみに使用することができます。材料ペア α_p および μ_p に必要な項の数は、適合する実験データの範囲と望まれる曲線フィッティングの精度に依存します。実践的には、3つの材料ペアがほとんどのデータに適合します。特定の材料について材料ペアが既知ではない場合、単軸試験データの曲線フィッティングがLAW69を用いてRadiossで、もしくは別のフィッティングソフトウェアを介して行うことが可能です。

Neo-Hookeanモデル

Ogden材料モデルのシンプルなケースが、ひずみエネルギー密度関数の次の式を使用して表現可能なNeo-Hookeanモデルです:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) \quad (62)$$

ここで、

I_1 右Cauchy-Greenテンソルの第1不変量

C_{10} 材料の定数

この表現は、次の場合に、LAW42 Ogdenひずみエネルギー密度関数から求められます:

$$\mu_1 = 2 \cdot C_{10}; \alpha_1 = 2, \text{ および } \mu_2 = \alpha_2 = 0$$

Neo-Hookeanモデルは、20%未満のひずみについてのみ正確であるシンプルなモデルです。

Mooney-Rivlinモデル

LAW42 Ogden材料モデルの少し複雑なケースが、ひずみエネルギー密度関数の次の式を使用して表現可能なMooney-Rivlinモデルです:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (63)$$

ここで、

I_1 および I_2 右Cauchy-Greenテンソルの第1および第2不変量

C_{10} および C_{01} 材料の定数

この表現は、次の場合に、LAW42 Ogdenひずみエネルギー密度関数から求められます:

$$\mu_1 = 2 \cdot C_{10}, \mu_2 = -2 \cdot C_{01}, \alpha_1 = 2, \text{ および } \alpha_2 = -2$$

Mooney-Rivlin定数は、材料サプライヤーまたは試験会社から入手できます。入手できない場合、単軸試験データの曲線フィッティングがLAW69を用いてRadiossで、もしくは別のフィッティングソフトウェアを介して行うことが可能です。Mooney-Rivlin材料則は、100%までのひずみについて正確です。

ポアソン比と材料の非圧縮性

材料が真に非圧縮性である場合、 $\nu = 0.5$ 。しかしながら、これは無限体積弾性率、無限音速、ひいては無限に小さいソリッド要素時間ステップをもたらすため、実践的には使用するのは不可能です。

$$K = \mu \cdot \frac{2(1+\nu)}{3(1-2\nu)} = \mu \cdot \frac{2(1+\nu)}{3(1-2 \cdot 0.5)} = \infty \quad (64)$$

異なるポアソン比入力の影響は、[図 137](#)に見られます。結果のうち最も大きな差は、より多くの量のひずみです。 $\nu = 0.4997$ の際、結果は試験データとより良く合致しますが、時間ステップは $\nu = 0.495$ の1/4となります。したがって、計算時間と精度のバランスをとるために、非圧縮性ゴム材料には $\nu = 0.495$ を使用することが推奨されます。

ポアソン比と体積弾性率の影響は、他のOgden材料則と同様になります。

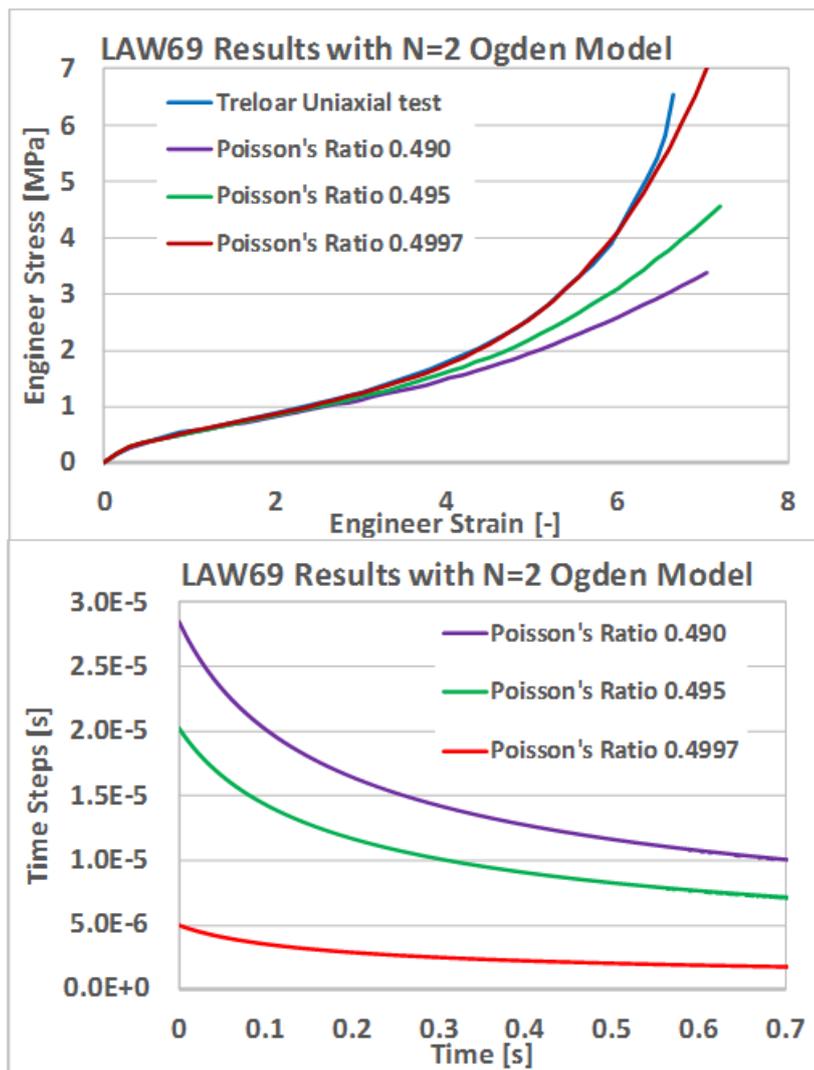


図 137:

陽解法シミュレーションの場合は、ポアソン比を高くすると、時間ステップ値の極端な減少や発散につながる可能性があります。

LAW42では、材料の非圧縮性は、密度の変化に比例して圧力を計算するペナルティアプローチを使用して求められます:

$$P = K \cdot Fscale_{blk} \cdot f_{blk}(J) \cdot (J - 1) \quad (65)$$

ここで、

K 体積弾性率

$J = \frac{V}{V_0} = \frac{m\rho_0}{m\rho} = \frac{\rho_0}{\rho}$ 質量が一定の場合に相対密度に簡易化される相対体積

$f_{blk}(J)$ 体積係数スケールファクターvs相対体積関数

$Fscale_{blk}$ 右記の関数の横軸のスケールファクター; $f_{blk}(J)$

超弾性材料の体積弾性率(K)は一般的に非常に大きい値であり、非圧縮性条件($J=1$)を保持するために必要な圧力-抵抗を提供します。しかし、材料が圧縮し始めた場合($J < 1$)、体積係数値のスケールリングを J の関数とすることが可能

な fct_ID_{blk} 入力関数を含めることにより、体積弾性率を増加させることができます。デフォルトではスケーリングはなく、関数識別子が0であれば、体積スケーリング関数の値は1に等しくなります。密度のばらつきが小さくなるように、つまり、 J の値が1に近付き材料が非圧縮性であるよう、LAW42コンポーネントの材料密度を出力 (/ANIM/BRICK/DENS) し、確認することが推奨されます。

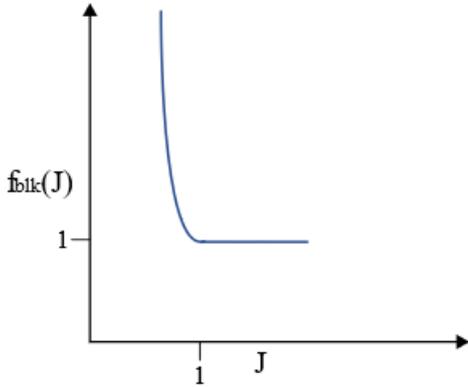


図 138: 体積弾性率スケールファクター関数 fct_ID_{blk}

粘性(速度)効果

LAW42ではMaxwellモデル(剛性 G_i とダンパ η_i を持つ n 個のスプリングの系として簡単に記述することができる)を使用した粘性(速度)効果がモデル化されます:

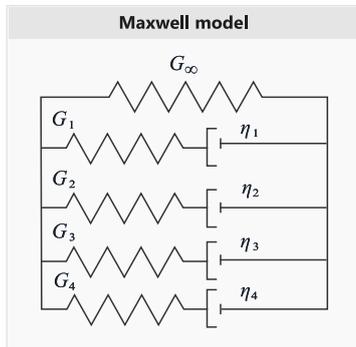


図 139: Maxwellモデル

Maxwellモデルは、Prony級数の入力 (G_i, τ_i) を使って表現されます。超弾性初期せん断弾性率 μ は、Maxwellモデルの長期せん断弾性率 G_∞ と同じであり、 τ_i は緩和時間です:

$$\tau_i = \frac{\eta_i}{G_i} \tag{66}$$

G_i および τ_i の値は正の値である必要があります。

/MAT/LAW62 (VISC_HYP)

ポリマーとエラストマーのモデル化に使用可能なRadiossでの超粘弾性材料則です。

この材料則の超弾性挙動は、以下のひずみエネルギー密度関数を用いて定義されます:

$$W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left(\lambda_1 \alpha_i + \lambda_2 \alpha_i + \lambda_3 \alpha_i - 3 + \frac{1}{\beta} (J^{-\alpha_i \beta} - 1) \right) \quad (67)$$

ここで、

W ひずみエネルギー密度
 λ_i i_{th} 主ストレッチ
 J 以下で定義される相対体積 式 67

$$\beta = \frac{\nu}{(1-2\nu)}$$

α_i および μ_i 材料定数係数ペア。
 5つまでの材料定数ペアを定義できます。

ポアソン比は $0 < \nu < 0.5$ でなければなりません。この材料則は、低いポアソン比の値を定義することによって、圧縮性、またはハイパーフォーム材料とも呼ばれる材料のモデル化に使用できます。

注: μ_i 材料係数は異なりますが、以下を用いて変換することが可能です:

$$\mu_i^{LAW62} = \frac{\mu_i^{LAW42} \cdot \alpha_i^{LAW42}}{2} \quad (68)$$

粘性(速度)効果

LAW62ではMaxwellモデル(剛性 G_i とダンパ η_i を持つ n 個のスプリングの系として簡単に記述することができる)を使用した粘性(速度)効果がモデル化されます:

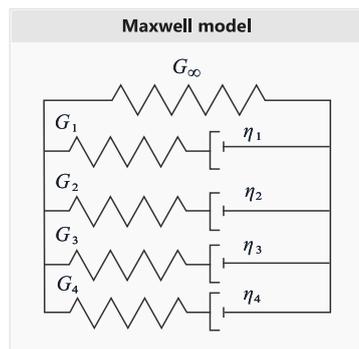


図 140: Maxwellモデル

Maxwellモデルは、Prony級数の入力を使って表現されます。初期せん断係数は:

$$G_0 = \sum_{i=1}^N \mu_i \quad (69)$$

μ_i の合計は0よりも大きい必要があります:

$$G_0 = G_\infty + \sum_i G_i \quad (70)$$

剛性比は:

$$\gamma_\infty = \frac{G_\infty}{G_0} = 1 - \sum_i \gamma_i \quad (71)$$

$$\gamma_i = \frac{G_i}{G_0} \quad (72)$$

ここで、

$$\gamma_i \in [0, 1], \sum_i \gamma_i < 1 \quad (73)$$

および、グラウンドせん断係数

$$G_0 = G_\infty + \sum_i G_i \quad (74)$$

相対時間 τ_i は正の値である必要があります:

$$\tau_i = \frac{\eta_i}{G_i} \quad (75)$$



注: 粘性が含まれる際、LAW62でのせん断係数は、粘性を含む初期せん断係数 $G_0 = \sum_{i=1}^N \mu_i$ です

が、LAW42ではせん断弾性係数は長時間せん断係数であり、これは粘性 $G_\infty = \frac{\sum_{p=1}^5 \mu_p \cdot \alpha_p}{2}$ を含みません。

/MAT/LAW69

この材料則(/MAT/LAW42 (OGDEN) の拡張)は、Ogden、Mooney-Rivlin材料モデルを使用して指定された超弾性および非圧縮性材料を定義します。材料パラメータが入力されているLAW42とは異なり、この材料則は単軸工学応力-ひずみ曲線からの試験データを用いて材料パラメータを計算します。

この材料は、シェル要素とソリッド要素に使用できます。

使用されるひずみエネルギー密度定式化は、*law_ID*に基づきます。

- *law_ID* = 1 (Ogden則):

$$W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{p=1}^5 \frac{\mu_p}{\alpha_p} (\bar{\lambda}_{1\alpha_p} + \bar{\lambda}_{2\alpha_p} + \bar{\lambda}_{3\alpha_p} - 3) + \frac{K}{2} (J - 1)^2 \quad (76)$$

- *law_ID* = 2 (Mooney-Rivlin則):

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (77)$$

材料パラメータ

Radiossは、応力ひずみ曲線(fct_ID_1)を読み出してから、非線形最小2乗フィッティングアルゴリズムを使用して、対応する材料パラメータペアを計算します。古典的なOgden則($law_ID=1$)では、計算された材料パラメータペアは μ_p および α_p で、 p の値は N_pair 入力を介して計算されます。最大値は $N_pair=5$ で、デフォルト値は2です。良好なフィッティングに $N_pair=3$ より大きい値は通常必要ありません。

Mooney-Rivlin則($law_ID = 2$)の場合、材料パラメータ C_{10} および C_{01} は、 μ_p と α_p がLAW42 Ogden則についてこの変換を用いて計算され得ることを前提に計算されます:

$$\mu_1 = 2 \cdot C_{10}, \mu_2 = -2 \cdot C_{01}, \alpha_1 = 2, \text{ および } \alpha_2 = -2$$

最小試験データ入力は、単軸工学応力-ひずみ曲線であるべきです。単軸圧縮データが利用可能である場合、工学ひずみは、負の値(圧縮)から正の値(引張)へと単調に増加するはずですが、圧縮では、-100%のひずみは物理的にあり得ないため、工学ひずみは-1.0未満でなければなりません。

非線形最小2乗フィッティングの精度を向上させるために、以下を推奨します。

- 実験データ曲線は、横軸点が一様に分布するスムーズな単調増加関数を表します。実験データ曲線内のデータ点数は、パラメータペア(N_pair)の数より多くする必要があります。
- 工学ひずみは圧縮では負、引張では正となります。圧縮試験データの場合、工学ひずみは-1.0より大きくなるはずですが(100%圧縮最大)、応力ひずみデータのみが使用できます。
- $N_pair \geq 3$ の場合は、試験データのカバー率を引張ひずみで100%以上、圧縮ひずみで50%以上にする必要があります。
- N_pair は、フィッティング手順での減衰を回避するために大きい値に設定しないようにする必要があります。

この材料則は、 $\mu_p \alpha_p > 0 (p=1, \dots, 5)$ がすべての荷重条件に関しパラメータペアが満足している際は安定しています。デフォルトで、Radiossは、このような条件($I_{check}=2$)を考慮して曲線を当てはめようとします。当てはまる曲線が見つからなかった場合、Radiossは弱い方の条件($I_{check}=1$)を使用し、これにより初期せん断超弾性係数(μ)が正であることが確実にされます。

計算された材料パラメータが入力試験データをどれほど良好に表しているかを見定めるために、Radioss Starterは、10%を超えないことが推奨される"フィッティングの平均誤差"を出力します。視覚的な比較のために、ひずみエネルギー密度から計算された応力-ひずみ曲線と、計算された材料パラメータもRadioss Starterによって出力されます。

単軸圧縮試験に含まれる摩擦のために、等しい2軸引張試験データを使用し、これを、非圧縮材料に有効であるこれらの式⁷を使って単軸圧縮データに変換したほうが、通常、より精確となります。

$$\varepsilon_c = \frac{1}{(\varepsilon_b + 1)^2} - 1 \quad (78)$$

$$\sigma_c = \sigma_b (1 + \varepsilon_b)^3 \quad (79)$$

ここで、

ε_c	単軸工学圧縮ひずみ
ε_b	2軸工学等引張ひずみ
σ_c	単軸工学圧縮応力
σ_b	2軸工学等引張応力

材料の非圧縮性

材料則LAW69は、非圧縮性を保持するために、LAW42と同じ手法を使用します。追加の情報については、LAW42のポアソン比と材料の非圧縮性をご参照ください。

粘性(速度)効果

粘性効果を含めるには、LAW69と共に/VISC/PRONYを使用する必要があります。また、OgdenまたはMooney-Rivlinパラメータを抽出するためにLAW69を使用し、これらのパラメータを粘性を加えてLAW42で使用することが可能です。

/MAT/LAW82

この材料モデルは、Ogden、Neo-Hookean、またはMooney-Rivlin材料モデルを使用して指定された超弾性および非圧縮性の材料を定義します。この法則は、通常、非圧縮性のゴム、ポリマー、フォーム、およびエラストマーのモデル化に使用されます。

この材料は、シェル要素とソリッド要素に使用できます。LAW42またはLAW62と比較すると、この材料則は、式 80 で与えられる異なるOgdenひずみエネルギー密度定式化を使用します。LAW82ひずみエネルギー密度定式化は、他のいくつかの有限要素ソルバーの超弾性モデルで使用されているものと合致します。したがって、このOgdenひずみエネルギー密度の形式の材料パラメータは、材料サプライヤーやその他のソースから入手できる場合があります。

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J - 1)^{2i} \quad (80)$$

ここで、

W	ひずみエネルギー密度
N	右記の数; 材料定数 α_i 、 μ_i および D_i
$\bar{\lambda}_i = J^{-\frac{1}{3}} \lambda_i$	偏差ストレッチ
J	以下で定義される相対体積 式 56

初期せん断係数:

$$\mu = \sum_{i=1}^N \mu_i \quad (81)$$

体積弾性率は、以下のルールに基づき、 $K = \frac{2}{D_1}$ のように計算されます:

- $\nu = 0$ の場合、 D_1 が入力される必要があります。
- $\nu \neq 0$ の場合、 D_1 入力は無視され、再計算されて、下記を用いてStarter出力に出力されます:

$$D_1 = \frac{3(1-2\nu)}{\mu(1+\nu)} \quad (82)$$

- $\nu = 0$ で $D_1 = 0$ の場合、 $\nu = 0.475$ のデフォルト値が使用され、 D_1 が以下を用いて計算されます 式 82

Neo-Hookeanモデル

LAW42と同様に、LAW82も以下を用いてNeo-Hookeanモデルに簡易化することが可能です:

$$\mu_1 = 2 \cdot C_{10}, \alpha_1 = 2, \mu_2 = \alpha_2 = 0$$

Mooney-Rivlinモデル

LAW42と同様に、LAW82も以下を用いてMooney-Rivlinモデルに簡易化することが可能です：

$$\mu_1 = 2 \cdot C_{10}, \mu_2 = 2 \cdot C_{01}, \alpha_1 = 2 \text{ および } \alpha_2 = -2$$

粘性(速度)効果

粘性効果を含めるには、LAW82と共に/VISC/PRONYを使用する必要があります。

ドラッカーの条件の安定性チェック

LAW42とLAW69では、ドラッカーの安定性がRadioss Starterにより自動的に計算されます。

ドラッカー安定性条件は、対数ひずみ(真ひずみ)における微小な変化に対応するキルヒホッフ応力の変化が下記の不均衡を満足する際にチェックします。

$$\sum_{i=1}^3 d\tau_i d\varepsilon_i > 0 \quad (83)$$

ここで、 $i=1, 2, 3$ 主方向

対数ひずみの変化

$$d\varepsilon_i = \frac{d\lambda_i}{\lambda_i} \quad (84)$$

$$d\tau_i = J \cdot d\sigma_i \quad \text{キルヒホッフ応力の変化}$$

$$d\boldsymbol{\tau} = \mathbf{D} : d\boldsymbol{\varepsilon} \quad \text{キルヒホッフ応力と対数ひずみとの間の関係}$$

ドラッカーの安定性条件は：

$$\sum d\boldsymbol{\varepsilon} : \mathbf{D} : d\boldsymbol{\varepsilon} > 0 \quad (85)$$

ここで、 \mathbf{D} は接線材料剛性マトリックスで、応力-ひずみ曲線の勾配でもあります。

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \quad (86)$$

安定した材料の場合、接線材料剛性 \mathbf{D} が正(応力-ひずみ曲線の傾きが正)になるよう要求します。接線材料マトリックス \mathbf{D} は、下記の条件が満たされる場合に正です：

$$I_1 = \text{tr}(\mathbf{D}) = D_{11} + D_{22} + D_{33} > 0 \quad (87)$$

$$I_2 = D_{11}D_{22} + D_{22}D_{33} + D_{33}D_{11} - D_{23}^2 - D_{13}^2 - D_{12}^2 > 0 \quad (88)$$

$$I_3 = \det(\mathbf{D}) > 0 \quad (89)$$

Ogdenモデルのキルヒホッフ応力が：

$$\tau_i = \sum_p \mu_p \left[\bar{\lambda}_i \alpha_p - \frac{1}{3} (\bar{\lambda}_1 \alpha_p + \bar{\lambda}_2 \alpha_p + \bar{\lambda}_3 \alpha_p) \right] + K(J^2 - J) \tag{90}$$

$D_{ij} = \frac{\partial \tau_i}{\partial \lambda_j}$ であるため、与えられたOgdenパラメータ α_p, μ_p (条件 $I_1 > 0, I_2 > 0$ and $I_3 > 0$) について、ドラッカー安定性における材料のひずみ範囲が計算されます。

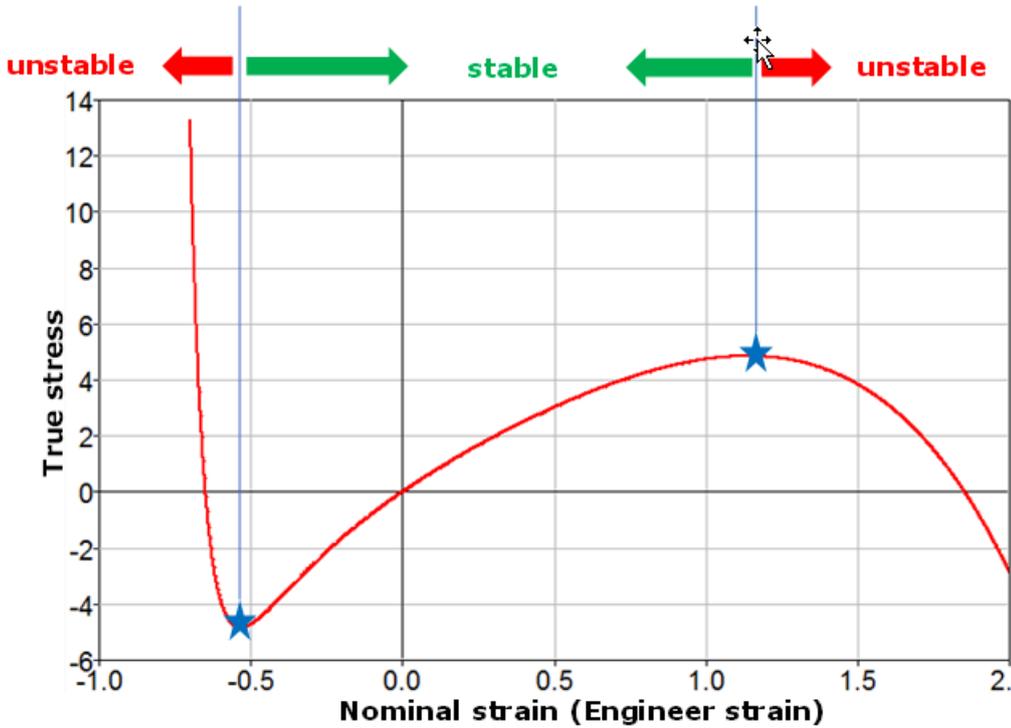


図 141:

ドラッカーの安全性の基準は、材料パラメータのセットが与えられている際、材料モデルが安定に留まるひずみ速度を計算します。この安定性チェックは各変形について生成することはできませんが、その代わりに、一般的には単軸、2軸および平面ひずみ載荷の下で材料の安定性を確認するために使用されます。

たとえば、以下のOgdenパラメータの使用:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 13.99077258830 & \alpha_1 &= 3.788192935039 \\ \mu_2 &= -9.13454532223 & \alpha_2 &= -7.17617341059 \\ \mu_3 &= 8.904655103235 & \alpha_3 &= -7.27028137148 \end{aligned}$$

次に、ドラッカー安定性がRadioss Starterで自動的にチェックされ、結果がStarter出力ファイル*0.outに出力されます。これは、与えられたOgdenパラメータでどの不安定度でひずみが起こり得るかを示します:

```

CHECK THE DRUCKER PRAGER STABILITY CONDITIONS
-----
MATERIAL LAW = OGDEN (LAW42)
MATERIAL NUMBER = 1
TEST TYPE = UNIXIAL
COMPRESSION: UNSTABLE AT A NOMINAL STRAIN LESS THAN -0.388000000000
TENSION: UNSTABLE AT A NOMINAL STRAIN LARGER THAN 0.970999999999
TEST TYPE = BIAxIAL
COMPRESSION: UNSTABLE AT A NOMINAL STRAIN LESS THAN -0.288000000000
TENSION: UNSTABLE AT A NOMINAL STRAIN LARGER THAN 0.278000000000
TEST TYPE = PLANAR (SHEAR)
COMPRESSION: UNSTABLE AT A NOMINAL STRAIN LESS THAN -0.368000000000
    
```

TENSION: UNSTABLE AT A NOMINAL STRAIN LARGER THAN 0.5829999999999

注: Neo-Hookean材料($C_{10} > 0$ (または $\mu_1 > 0$))の場合、材料は常に安定であるため、ドラッカー安定性チェックでは限界値は見つかりません。

Mooney-Rivlin材料の場合、 C_{01} or μ_2 は負になり得て、これが不安定性を導くため、ドラッカー安定性はチェックされる必要があります。

/MAT/LAW88

この材料則は、異なるひずみ速度における表形式の単軸引張および圧縮工学応力およびひずみ試験データを用いて非圧縮性材料をモデル化します。ソリッド要素とのみ適合性があります。

この材料は、以下のOgdenひずみエネルギー密度関数に基づきますが、他の多くの超弾性材料モデルとは異なり、材料定数の抽出に曲線フィッティングを必要としません。⁸

$$W = \underbrace{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^m \frac{\mu_j}{\alpha_j} (\bar{\lambda}_{i\alpha_j} - 1)}_{\text{deviatoric part}} + \underbrace{K(J - 1 - \ln J)}_{\text{spherical part}} \quad (91)$$

代わって、この材料則は、表形式の単軸応力ひずみ曲線データから直接Ogden関数を決定します。

他のOgden材料則とは異なり、体積弾性率は試験データから入力、もしくはLAW69 Ogden曲線フィッティングのStarter出力から抽出される必要があります。LAW42またはLAW69とLAW88との結果を比較する際、同じ体積弾性率を使用しなければなりません。

除荷の挙動

除荷は、除荷関数を使って、もしくはエネルギーに基づきヒステリシスおよび形状係数入力を損傷モデルに与えることによって表すことができます。

損傷モデルを使用する場合、載荷と除荷の両方に載荷曲線が使用され、除荷応力テンソルは次の式に従って減少します：

$$\sigma = (1 - D)\sigma \quad (92)$$

ここで、

$$D = (1 - H_{ys}) \left(1 - \left(\frac{W_{cur}}{W_{max}} \right)^{Shape} \right) \quad (93)$$

ここで、

W_{cur} 現在のエネルギー

W_{max} 準-静的挙動に従った最大エネルギー

H_{ys} および $Shape$ ユーザーによる入力

除荷曲線が与えられる場合、これらのオプションが使用できます：

引張
= 0

載荷と除荷

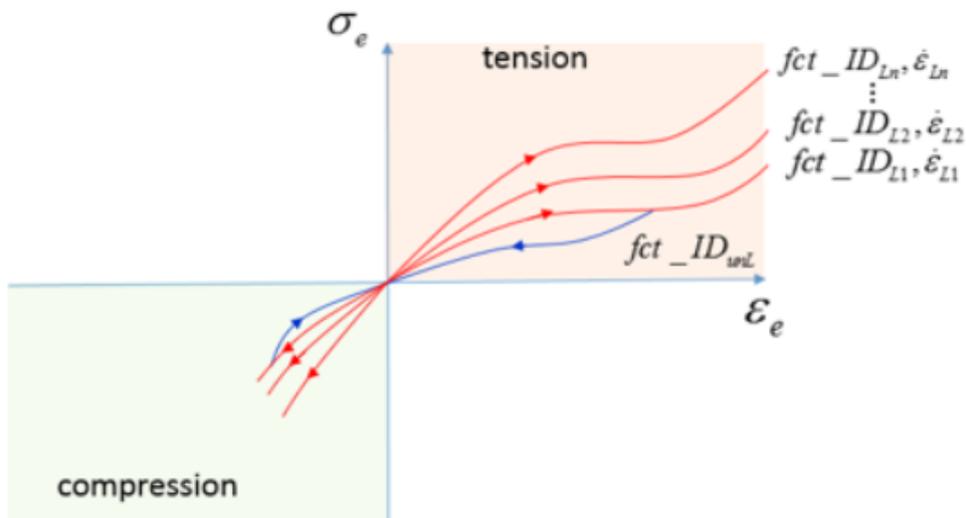


図 142:

載荷は右記を使用; 載荷関数 $fct_ID_{L_i}$ および $\dot{\epsilon}_{L_i}$

除荷は、除荷関数 fct_ID を使用 $_{unL}$

= 1

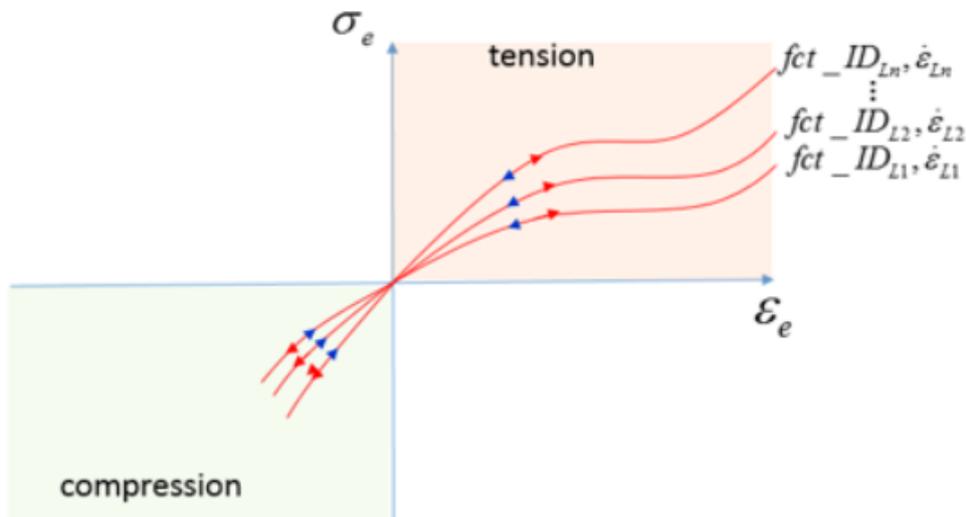


図 143:

載荷と除荷はすべて右記を使用; 載荷関数 $fct_ID_{L_i}$ および $\dot{\epsilon}_{L_i}$

引張

載荷と除荷

= -1

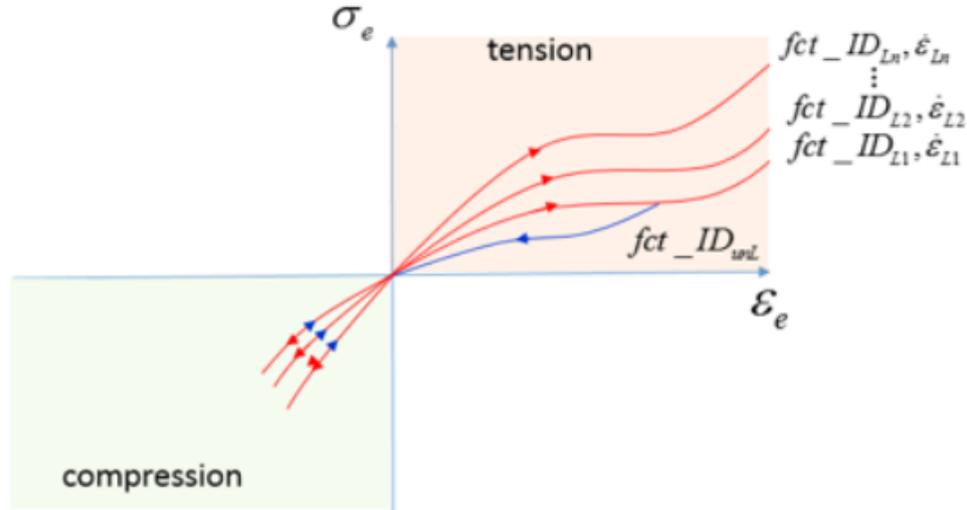


図 144:

載荷は右記を使用; 載荷関数 fct_ID_{Li} および $\dot{\epsilon}_{Li}$

- 引張
除荷は、除荷関数 fct_ID を使用 $_{unL}$
- 圧縮
除荷は右記を使用; 載荷関数 fct_ID_{Li} および $\dot{\epsilon}_{Li}$

粘性(速度)効果

ひずみ速度効果は、異なるひずみ速度における工学応力ひずみ試験データを含めることによってモデル化することができます。これは、従来のヒステリシス材料モデルについて粘性パラメータを計算するよりも簡単な場合があります。

まとめ

利用可能な試験データに最もフィットする材料則を使用してください。

たとえば、最小限の試験データが入手でき、ひずみが大き過ぎない場合、LAW42 Neo-Hookeanモデルが使用できます。荷重状態が既知である場合、応力状態を表す試験データを擁することが重要で、材料モデルはその試験データにフィットさせてください。

参考文献

5. Ogden, R. W., and Non-linear Elastic Deformations."Ellis Horwood."New York (1984)
6. Miller, Kurt."Testing Elastomers for Hyperelastic Material Models in Finite Element Analysis" Axel Products, Inc., Ann Arbor, MI (2017).Last modified April 5, 2017
<http://www.axelproducts.com/downloads/TestingForHyperelastic.pdf>
7. Axel Products, Inc. "Compression or Biaxial Extension", Ann Arbor, MI (2017).Last modified November 12, 2008
<http://www.axelproducts.com/downloads/CompressionOrBiax.pdf>

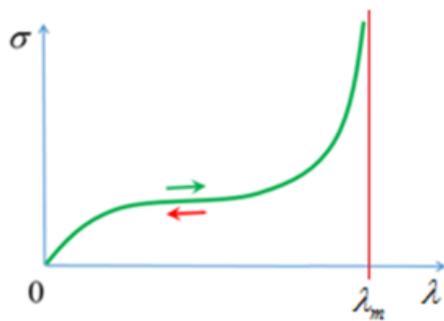


図 145: ロッキングストレッチ λ_m

パラメータ入力では、ポアソン比が次のように計算されます:

$$\nu = \frac{3K - 2\mu}{6K + 2\mu} \quad (96)$$

- 関数入力の使用時、ポアソン比 ν と $Itype$ を定義する必要があります。 $Itype$ は、入力としてどのタイプの工学的応力ひずみ試験データを使用するかを定義します。

。

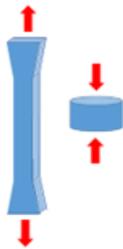


図 146: $Itype = 1$: 単軸データ試験

。

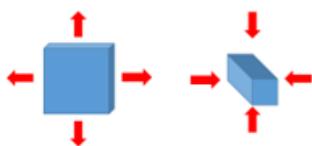


図 147: $Itype = 2$: 等2軸データ試験

。



図 148: $Itype = 3$: 平面データ試験

ポアソン比と材料の非圧縮性

関数入力が定義されると、パラメータ μ , D , λ_m は無視され、Radiossは入力関数をフィッティングすることで材料定数を計算します。RadiossによるArruda-Boyceパラメータのフィッティングには、非線形最小2乗アルゴリズムが使用されます。カーブのフィッティングは、ポアソンの値が0.5に近い、すなわち材料が非圧縮性であるという仮定のもとで行われます。その他の超弾性材料モデルと同様、ポアソン比の値が0.5に近いと、体積弾性係数は大きくなり、時間ステップは小さくなります。非圧縮性とリーズナブルな時間ステップの良好なバランスのためには、ポアソン比の値は0.495が推奨されます。

材料フィッティングの情報は、Starter出力ファイル(*0000.out)で見つかります。

```

FITTING RESULT COMPARISON:

UNIAXIAL TEST DATA

NOMINAL STRAIN      NOMINAL STRESS (TEST)      NOMINAL STRESS (RADIOSS)
-----
0.0000              0.0040                     0.0000
0.0300              0.3000                     0.2387
0.0600              0.5500                     0.4643
0.1000              0.8000                     0.7472
0.2000              1.4000                     1.3809
0.3000              2.0000                     1.9346
0.5000              2.7000                     2.8831
0.7000              3.4000                     3.6982
1.0000              4.0000                     4.7799
  
```

```

AVERAGED ERROR OF FITTING :      20.25%
  
```

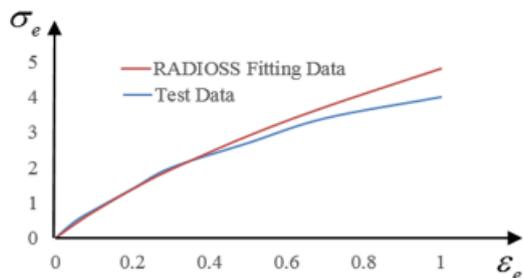


図 149: LAW92関数の例

フィッティングのエラーおよびフィッティングされた材料パラメータは、Starter出力ファイルに出力されます。

```

FITTED PARAMETERS FOR HYPERELASTIC_MATERIAL LAW
-----
ARRUDA-BOYCE LAW
MU . . . . . = 2.731364005395
D. . . . . = 7.3468374874591E-03
LAM. . . . . = 2358.028306182
GROUND-STATE SHEAR MODULE . . . . . = 2.731364300131
BULK MODULUS. . . . . = 272.2259752463
  
```

図 150:

粘性(速度)効果

粘性効果を含めるには、LAW92と共に/VISC/PRONYを使用する必要があります。

参考文献

Yeoh (/MAT/LAW94)

LAW94は、非圧縮性材料を表現するために使用される超弾性材料モデルです。

LAW94のひずみエネルギー密度関数は第一ひずみ不変量にのみ依存し、次のように計算されます：

$$W = \sum_{i=1}^3 \left[\frac{C_{i0}(\bar{I}_1 - 3)^i}{W(\bar{I}_1)} + \frac{1}{D_i} \frac{(J - 1)^{2i}}{U(J)} \right] \quad (97)$$

ここで、

$$\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2 \quad \text{1つ目のひずみ不変量}$$

$$\bar{\lambda}_i = J^{-\frac{1}{3}} \lambda_i \quad \text{偏差ストレッチ}$$

Cauchy応力は：

$$\sigma_i = \frac{\lambda_i}{J} \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} \quad (98)$$

材料パラメータ

非圧縮材料については*i*=1のみであり、*D*₁が入力され、YeohモデルがNeo-Hookeanモデルに縮小されます。

*C*₁₀、*C*₂₀、*C*₃₀ 材料定数は、材料の偏差部(形状変化)を指定

*D*₁、*D*₂、*D*₃ パラメータは、材料の体積変化を指定

これら6つの材料定数は、曲線フィッティング材料試験データによって計算される必要があります。[RD-E:5600 超弾性材料と曲線入力](#) は、単軸試験データ用のYeohフィッティングComposeスクリプトを含みます。Yeoh材料モデルは、曲線フィッティングが単軸試験データのみで使用で得られた場合でさえも、すべての変形モデルをモデル化するために示されています。

初期せん断弾性係数と体積弾性係数は：

$$\mu = 2 \cdot C_{10} \quad (99)$$

および

$$K = \frac{2}{D_1} \quad (100)$$

ポアソン比と材料の非圧縮性

LAW94は、非圧縮性材料モデルとしてのみ使用できます。

*D*₁ = 0の場合、非圧縮性材料が考慮されます。ここで、*v* = 0.495と*D*₁は次のように計算されます：

9. Arruda, E. M. and Boyce, M. C., 1993, "A three-dimensional model for the large stretch behavior of rubber elastic materials", J. Mech.Phys.Solids, 41(2), pp. 389-412

$$D_1 = \frac{3(1-2\nu)}{\mu(1+\nu)} \tag{101}$$

参考文献

Bergstrom-Boyce (/MAT/LAW95)

この材料則は、エラストマー状の材料の非線形時間依存を予測するための構成モデルです。非線形粘弾性時間依存材料の応答を表すために、超弾性材料応答およびBergstrom-Boyce材料モデルに多項式材料モデルを使用します。

この材料則はソリッド要素とのみ適合性があります。

材料の応答は、2つの並列ネットワークAとBを用いて表すことができます。ネットワークAは、非線形超弾性コンポーネントを伴う均衡ネットワークです。ネットワークBでは、非線形超弾性コンポーネントは非線形粘弾性流れ要素と直列であり、したがって、時間依存のネットワークです。

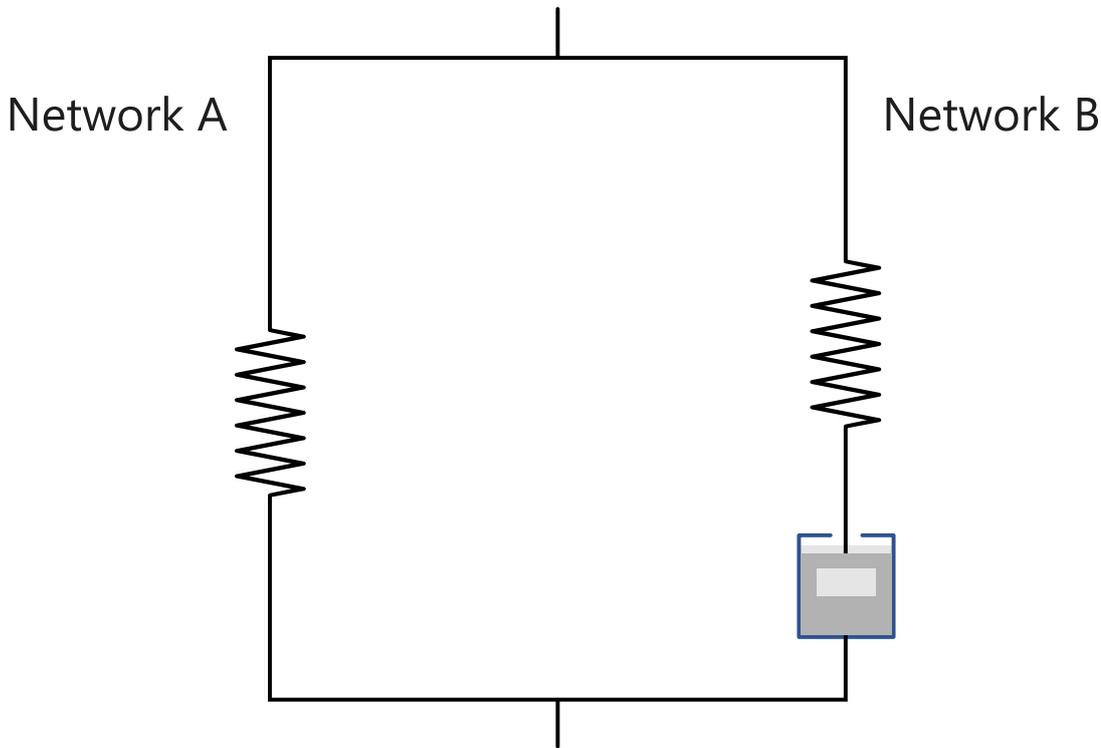


図 151:

材料パラメータ

両方のネットワークで、超弾性コンポーネントに同じ多項式ひずみエネルギー密度定式化が用いられます。ネットワークBでは、係数 S_b によってスケールリングされます。ひずみエネルギー密度はその後、ネットワークの超弾性コンポーネント用に書き出されます:

$$W_A = \sum_{i+j=1}^3 C_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i \cdot (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{D_i} (J - 1)^{2i} \tag{102}$$

10. Yeoh, O. H. "Some forms of the strain energy function for rubber." Rubber Chemistry and technology 66, no. 5 (1993): 754-771

および

$$W_B = S_b \cdot W_A \quad (103)$$

ここで、

$$I_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2$$

$$I_2 = \bar{\lambda}_1^{-2} + \bar{\lambda}_2^{-2} + \bar{\lambda}_3^{-2}$$

$$\bar{\lambda}_i = J^{-\frac{1}{3}} \lambda_i$$

C_{ij} および D_i 材料パラメータ

超弾性コンポーネントCauchy応力は次のように計算されます：

$$\sigma_i = \frac{\lambda_i}{J} \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} \quad (104)$$

全応力は、ネットワークAとネットワークBの応力の和です。

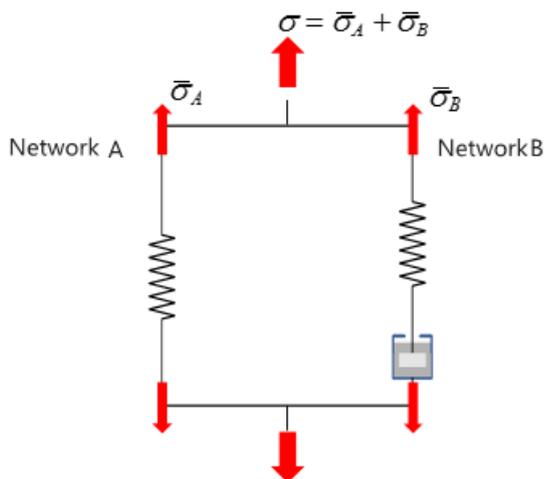


図 152:

$$\sigma = \bar{\sigma}_A + \bar{\sigma}_B$$

$W_B = S_b \cdot W_A$ なので、 $\bar{\sigma}_B = S_b \cdot \bar{\sigma}_A$ で、全応力は $\sigma = (1 + S_b) \cdot \bar{\sigma}_A$ となります。

たとえば1つの引張試験で、 $S_b = 2$ を使用すると、応力は、粘度を考慮しない(すなわち超弾性のみを考慮する)ケースの3倍となります。

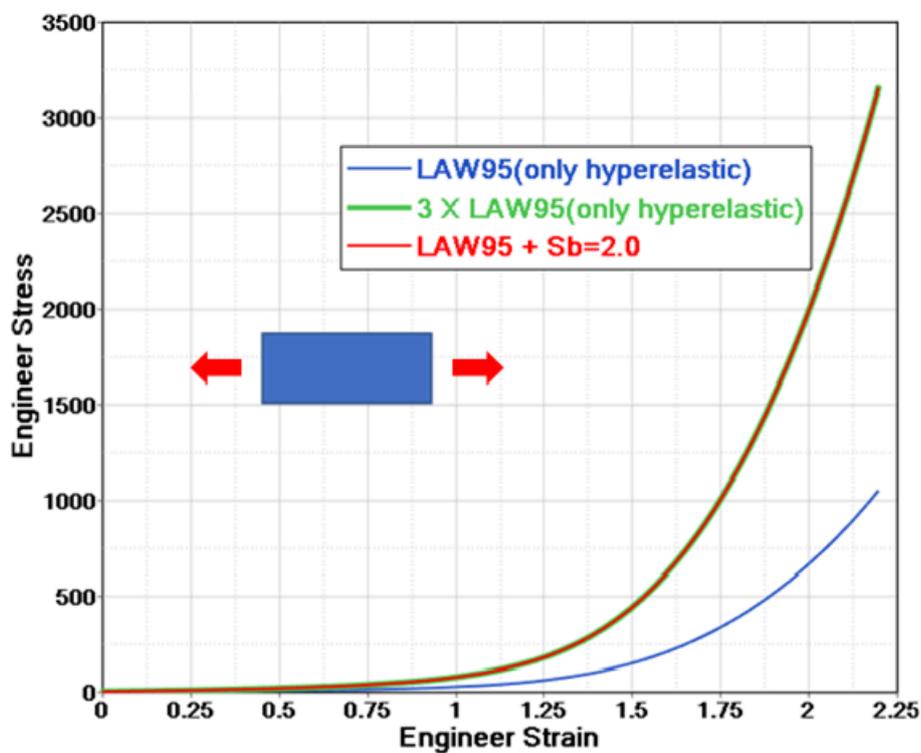


図 153:

C_{ij} の特別な値について、多項式モデルは下記の材料モデルに縮小することが可能です。

- Yeoh:

$$j = 0$$

ここで、 C_{10} 、 C_{20} 、 C_{30} は、非ゼロ。

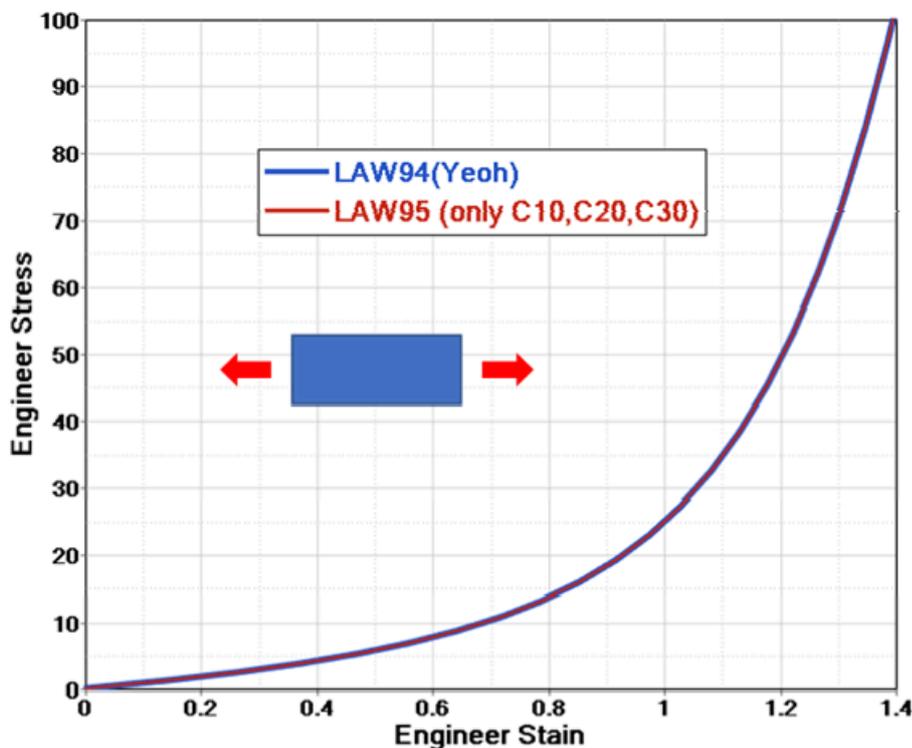


図 154:

- Mooney-Rivlin:

$$i + j = 1$$

ここで、 C_{10} と C_{01} は非ゼロ、 $D_2 = D_3 = 0$ 。

- Neo-Hookean:

C_{10} と D_1 のみが非ゼロ。

ここで、

C_{ij} および D_i

準-静的材料試験データ用にカーブフィッティングを行うことで計算することのできる材料パラメータ。

RD-E: 5600 超弾性材料と曲線入力には、Mooney-RivlinおよびYeoh材料モデル用のカーブフィッティングの例が含まれています。 D_1 は、体積弾性係数から計算されるか、もしくは空白のままとされます。

初期せん断弾性係数と体積弾性係数は次のように計算されます:

$$\mu = 2(S_b + 1)(C_{10} + C_{01}) \tag{105}$$

および

$$K = \frac{2}{D_1}(1 + S_b) \tag{106}$$

材料の体積弾性係数が既知である場合、 D_1 は計算することが可能です。もしくは、 $D_1=0$ である場合、非圧縮性材料が仮定されます。

粘性(速度)効果

ネットワークBでの有効クリープひずみ速度は、次のように与えられます:

$$\dot{\epsilon}_B^v = A(\tilde{\lambda} - 1 + \zeta)^C \frac{\bar{\sigma}_B}{\tau_{ref}}^M \quad (107)$$

ここで、

$$\tilde{\lambda} = \sqrt{\frac{\bar{I}_1}{3}}$$

$\bar{\sigma}_B$ ネットワークBでの有効応力。

A, ζ, M, C そして τ_{ref} 入力材料パラメータ

材料定数 A, M および C は、リファレンスガイドで定義されている特定の実数範囲に制限されます。制限されたデータが入手可能な場合、試行錯誤法¹¹を使ってこれらの定数を決定することができます。デフォルト値 $\zeta, M, C, S_b=1.6$; および $A=5$ で開始します。続いて、少なくとも1つのひずみ速度についてモデルの予測と実験データとを比較し、 A を調整して、ひずみ速度データにフィットするものを得ます。

参考文献

11. Bergström, J. S., and M. C. Boyce. "Constitutive modeling of the large strain time-dependent behavior of elastomers." *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 46, no. 5 (1998): 931-954

弾塑性材料

Johnson-Cook (/MAT/LAW2)

LAW2には、応力計算のための3つのパートがあります。

$$\sigma = (a + b\varepsilon_p^n) \left(1 + c \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) (1 - T^{*m})$$

Influence of plastic strain

Influence of strain rate

Influence of temperature change

図 155:

- 塑性ひずみの影響
- ひずみ速度の影響
- 温度変化の影響

材料パラメータ

LAW2で材料パラメータを入力する方法は2つあります。

- $Iflag=0$: Johnson-Cookパラメータ a , b , n : アクティブ
- $Iflag=1$: 降伏応力、UTS (公称応力)、またはUTSでのひずみによる、新しい簡素化された入力

$Iflag=0$

$$\sigma = a + b \cdot \varepsilon_p^n \tag{108}$$

ここで、

a

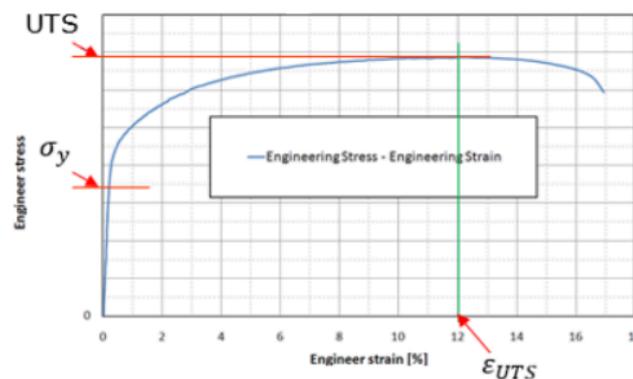
材料試験で読み取られ、真応力に変換される可能性のある降伏応力です。

b および n

材料パラメータ材料の応力-ひずみ曲線のフィッティング (例: Altair Composeスクリプト) により、これら2つのパラメータが求められます。

$Iflag=1$

この新しい入力では、ネッキングポイントでの降伏応力 (σ_y)、引張り強さ (UTS) および工学ひずみ (ε_{UTS}) が必要です。この新しい入力により、Radiossは自動的に a , b および n の等価値を計算します。



```

JOHNSON COOK MODEL :
YIELD STRESS . . . . . = 0.300000000000000
ULTIMATE STRESS (UTS) . . . . . = 0.400000000000000
STRAIN AT UTS (Ag) . . . . . = 0.200000000000000
YIELD COEFFICIENT A . . . . . = 0.300000000000000
YIELD COEFFICIENT B . . . . . = 0.4117620075292
YIELD COEFFICIENT N . . . . . = 0.4861908181172
EPS-MAX . . . . . = 1.00000000000000E+30
SIG-MAX . . . . . = 1.00000000000000E+30
ISO-KINEMATIC HARDENNING FACTOR . . . . . = 0.000000000000000
    
```

input with Iflag=1
RADIOSS calculated automatically

図 156: 引張試験

ひずみ速度

ひずみ速度は、引張または破壊における衝突パフォーマンスで、材料特性に大きな影響を与えます。Johnson-Cook理論では、降伏応力は直接ひずみ速度の影響を受け、次のように表されます：

$$\sigma = (a + b \cdot \epsilon_p^n) \left(1 + c \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \tag{109}$$

一般に、試験ひずみ速度が増加すると降伏応力は増加します。ひずみ速度係数 c により、降伏応力の増加係数をスケールリングできます。 $c=0$ の場合、または $\dot{\epsilon}_0 = 10^{30}$ あるいは $\dot{\epsilon} \leq \dot{\epsilon}_0$ の場合、ひずみ速度の影響もまた定義されません。

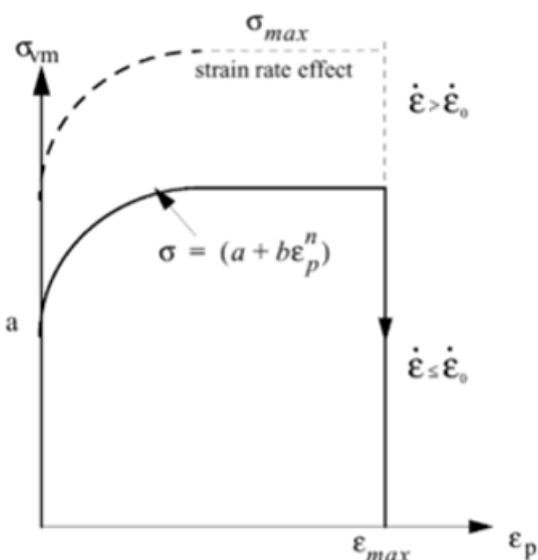


図 157:

温度変化

温度が上昇すると降伏応力は低下します。LAW2では、影響は $(1 - T^{*m})$ により考慮されます。

$$\sigma = (a + b \cdot \varepsilon_p^n) \left(1 + c \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) (1 - T^{*m}) \quad (110)$$

ここで、

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_{melt} - T_r} \quad (111)$$

ここで、

T_{melt} 溶融温度(単位はケルビン)。

T_r 室温(単位はケルビン)。

T は、以下で計算されます。

$$T = T_i + \frac{E_{int}}{\rho C_p (Volume)} \quad (112)$$

ここで、

E_{int} 内部エネルギー。

内部エネルギーの変化は、Johnson-Cook則で降伏応力に影響を与えます。

硬化係数

金属は降伏するまで変形し、その後一般には硬化します(降伏応力は増加)。材料により硬化の様子は異なります(等方硬化、移動硬化など)。これは非常に重要な材料特性でもあります(スプリングバックの場合)。

LAW2では、オプション $C_{hard}HARD$ (硬化係数)を使用して、材料にどの硬化モデルを使用するかを記述します。この機能はLAW36、43、44、57、60、66、73、74でも使用できます。

$C_{hard}HARD$ の値は1~0です。等方モデルの場合は $C_{hard}HARD=0$ 、移動Prager-Zieglerモデルの場合は $C_{hard}HARD=1$ 、これら2つのモデルの間の硬化の場合は1と0の間となります。

$C_{hard}HARD = 0$: 等方性モデル

1次元のケースでは、材料は降伏応力後に強化されます。前回の引張りの最大応力がそれに続く荷重での降伏となり、この新しい降伏応力はそれに続く引張りおよび圧縮での降伏応力と同じになります。

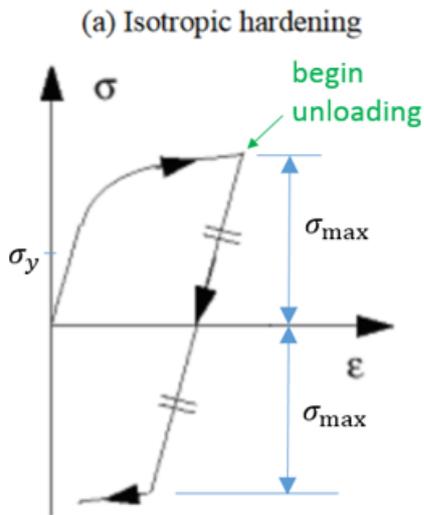


図 158:

$C_{hardHARD} = 1$: 運動学的Prager-Zieglerモデル

Bauschinger効果(引張りによる硬化の後、圧縮による軟化が発生し、圧縮での平均降伏が低下する)をモデル化するには、移動硬化を使用します。

(b) Prager-Ziegler kinematic hardening

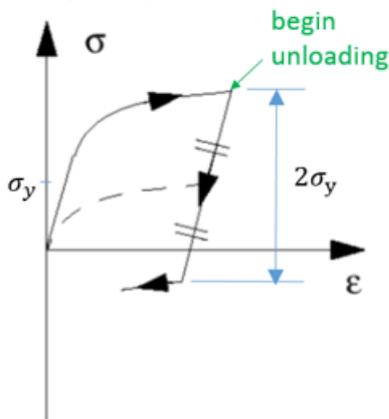


図 159:

弾塑性区分線形材料(/MAT/LAW36)

LAW36では、さまざまなひずみ速度に対してさまざまな塑性応力-ひずみ曲線を直接定義できます。

大きなひずみ速度の塑性応力-ひずみ曲線は、必ず小さなひずみ速度の塑性応力-ひずみ曲線より上になります。

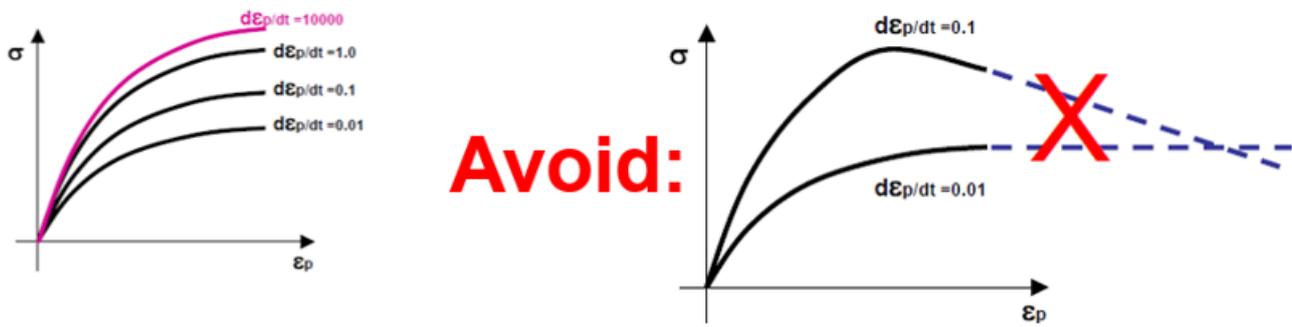


図 160:

ヤング率

ヤング率は、オプション fct_ID_E 、 E_{inf} および C_E を使用して、除荷時に更新 (低減) できます。この機能の使用により、ハイテン鋼のスプリングバックの精度 (除荷相時) が向上します。この機能は材料 LAW43、LAW57、LAW60、LAW74 および LAW78 でも使用できます。

- fct_ID_E を使用したヤング率の更新 ($fct_ID_E \neq 0$):

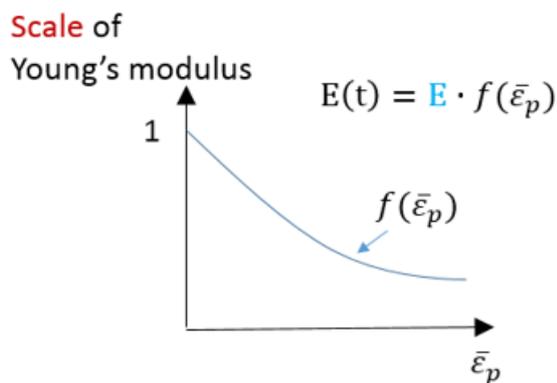


図 161:

- E_{inf} および C_E を使用したヤング率の更新 ($fct_ID_E = 0$):

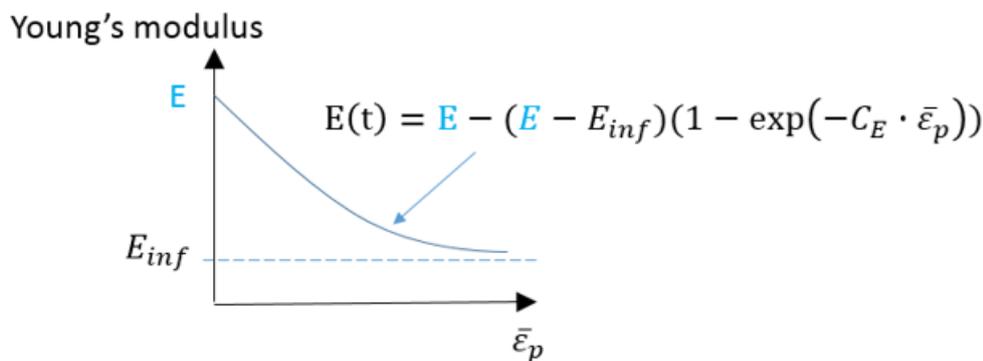


図 162:

材料の挙動

fct_ID_p は、特定の材料における引張と圧縮の挙動の区別(圧力依存降伏)に使用されます。したがって、有効降伏応力は公称降伏応力に実際の圧力に対応する降伏係数を乗じることによって得られます。

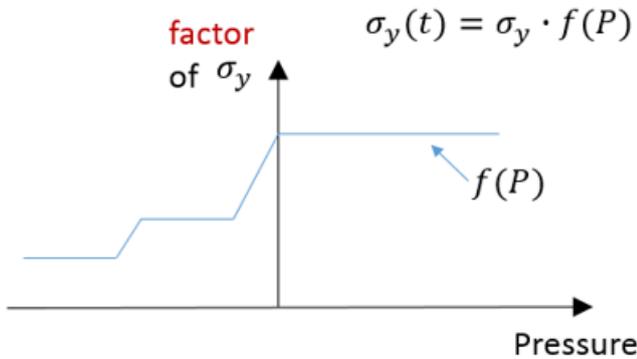


図 163:

See Also

[/MAT/LAW2 \(PLAS_JOHNS\) \(Starter\)](#)

RD-E:1101 弾塑性材料則の特性化

HILL材料

Radiossでは、LAW32、LAW43、LAW72、LAW73、LAW74、LAW78、およびLAW93の各材料則でHILL基準を使用します。

HILL基準

一般的なHILL基準は次のとおりです:

- 3D等価HILL応力:

$$f = \sqrt{F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + G(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 2L\sigma_{yz}^2 + 2M\sigma_{zx}^2 + 2N\sigma_{xy}^2} \quad (113)$$

$$= \sqrt{(G+H)\sigma_{xx}^2 + (F+H)\sigma_{yy}^2 + (F+G)\sigma_{zz}^2 - 2H\sigma_{xx}\sigma_{yy} - 2F\sigma_{yy}\sigma_{zz} - 2G\sigma_{zz}\sigma_{xx} + 2L\sigma_{yz}^2 + 2M\sigma_{zx}^2 + 2N\sigma_{xy}^2}$$

- シェル要素:

$$f = \sqrt{F\sigma_{yy}^2 + G\sigma_{xx}^2 + H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 2N\sigma_{xy}^2} = \sqrt{(G+H)\sigma_{xx}^2 + (F+H)\sigma_{yy}^2 - 2H\sigma_{xx}\sigma_{yy} + 2N\sigma_{xy}^2} \quad (114)$$

ここで、 F 、 G 、 H 、 L 、 M 、および N は、6つのHILL異方性パラメータです。シェル要素に必要なHILLパラメータは、 F 、 G 、 H 、および N の4つのみです。

LAW78ではHILL基準は次のとおりです:

$$\phi(A) = \frac{1}{G+H} \cdot A_{xx}^2 - \frac{2r_0}{1+r_0} A_{xx}A_{yy} + \frac{r_0(1+r_0)}{r_0(1+r_0)} A_{yy}^2 + \frac{r_0+r_0}{r_0(1+r_0)} (2r_{45}+1) A_{xy}^2 \quad (115)$$

ランクフォードパラメータを使用してHILLを判断する方法が2種類あります。

- ひずみ速度 r_{00} 、 r_{45} 、 r_{90} (LAW32、LAW43、LAW72、LAW73)

- 降伏応力比 $R_{11}, R_{22}, R_{33}, R_{12}, R_{13}, R_{23}$ (LAW74, LAW93)

ひずみ速度

ランクフォードパラメータ r_α は、面内の塑性ひずみと厚み方向の塑性ひずみ ϵ_{33} との比率です。

$$r_\alpha = \frac{d\epsilon_{\alpha+\pi/2}}{d\epsilon_{33}} \quad (116)$$

ここで、 α は、直交異方性方向1に対して成す角度です。

r_α は、直交異方性方向1に対してさまざまな角度で切断した多くの試料で測定できます。荷重の方向を直交異方性の方向1とした引張試験で測定した r_{00} と同様。 r_{90} 荷重の方向が直交異方性の方向1と直交する引張試験で測定した

ひずみ速度は、試料の厚み方向のひずみに対する試料の幅方向のひずみの比率です。

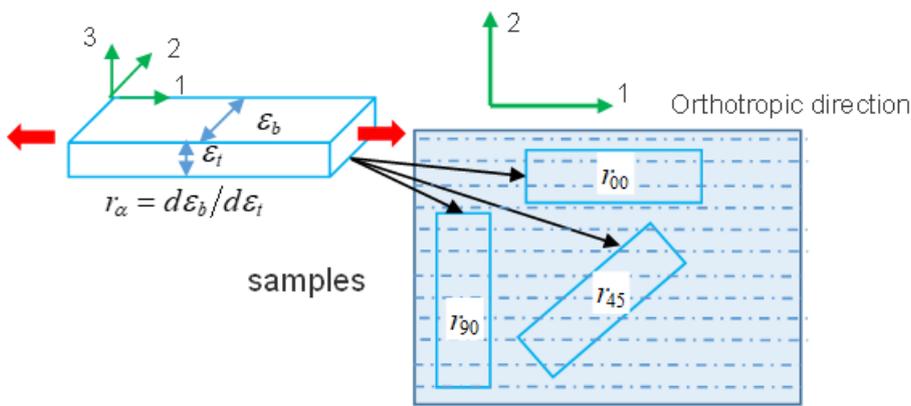


図 164:

この場合のHILLパラメータは次のようになります:

$$F = \frac{r_{00}}{r_{90}(r_{00} + 1)} \quad (117)$$

$$G = \frac{1}{(r_{00} + 1)} \quad (118)$$

$$H = \frac{r_{00}}{(r_{90} + 1)} \quad (119)$$

$$N = \frac{(1 + 2r_{45})(r_{00} + r_{90})}{2r_{90}(r_{00} + 1)} \quad (120)$$

ここで、 $G + H = 1$ 。

LAW32, LAW43, およびLAW73のHILL基準は次のとおりです:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{A_1\sigma_1^2 + A_2\sigma_2^2 - A_3\sigma_1\sigma_2 + A_{12}\sigma_{12}^2} \quad (121)$$

$$R = \frac{r_{00} + 2r_{45} + r_{90}}{4}$$

$$H = \frac{R}{1 + R}$$

$$A_1 = H \left(1 + \frac{1}{r_{00}} \right)$$

$$A_2 = H \left(1 + \frac{1}{r_{90}} \right)$$

$$A_3 = 2H$$

$$A_{12} = 2H(r_{45} + 0.5) \left(\frac{1}{r_{00}} + \frac{1}{r_{90}} \right)$$

これらのすべての基準でランクフォードパラメータ(ひずみ速度) r_{00} , r_{45} , r_{90} が要求され、HILLパラメータ A_i がRadiossによって自動的に計算されます。

降伏応力比

LAW93で使用する降伏応力比は次のとおりです:

$$R_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sigma_0} \quad (122)$$

降伏応力比 R_{ij} を取得するには、2つの荷重ケースの降伏応力を測定する必要があります。

- 引張試験で得られた降伏応力 σ_{11} , σ_{22} , σ_{33}
- せん断試験で得られた降伏せん断応力 σ_{12} , σ_{13} , σ_{23}

LAW93でパラメータ入力を使用する場合は、初期応力パラメータ σ_y を参照降伏応力 σ_0 として取得します。曲線入力を使用する場合は、曲線から読み取った降伏応力を参照降伏応力 σ_0 として取得します。

シェルの4つのHILLパラメータはRadiossによって自動的に計算されます。

$$F = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{11}^2} \right) \quad (123)$$

$$(124)$$

$$H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{11}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} \right) \quad (125)$$

$$N = \frac{3}{2R_{12}^2} \quad (126)$$

LAW74では、降伏応力比 R_{ij} が、降伏応力 σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} と σ_{12} , σ_{13} , σ_{23} 入力で直接使用され、ソリッドの6つのHILLパラメータがRadiossによって自動的に計算されます。

$$F = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{22}^2} + \frac{1}{\sigma_{33}^2} - \frac{1}{\sigma_{11}^2} \right)$$

$$G = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{22}^2} + \frac{1}{\sigma_{33}^2} - \frac{1}{\sigma_{11}^2} \right)$$

$$H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{22}^2} + \frac{1}{\sigma_{33}^2} - \frac{1}{\sigma_{11}^2} \right)$$

$$L = \frac{1}{2\sigma_{23}^2}$$

$$M = \frac{1}{2\sigma_{31}^2}$$

$$N = \frac{1}{2\sigma_{12}^2}$$

シェル要素の場合は、 $M = N$ と $L = N$ を取得します。

コンクリートおよび岩石材料

Radiossでは、これらの材料は、岩石またはコンクリート材料のモデル化に使用できます。

これらの材料には、料が破壊したか塑性降伏したかを判断する圧力依存モデルDrucker-Prager降伏基準¹²を使用します。

コンクリート材料(/MAT/LAW10と/MAT/LAW21)

Drucker-Prager降伏基準

材料が破壊されている、または塑性降伏を起こしていることは、次の式を使用して圧力によって特定されます：

$$F = \frac{J_2}{J_{2part}} - \frac{(A_0 + A_1P + A_2P^2)}{I_{1part}} \quad (127)$$

ここで、

J_2 応力の偏差成分の第2応力不変量(フォンミーゼス応力)および $P = -\frac{I_1}{3}$ 。

I_1 第1応力不変量(静水圧)。

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = -3P$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = \frac{1}{3} \sigma_{VM}^2 \quad \text{単軸試験内}$$

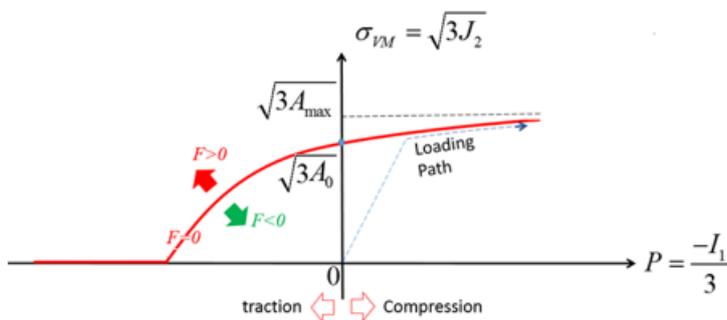


図 165: Drucker-Prager降伏基準

多項式を使用して、材料のDrucker-Prager降伏曲面における圧力 $A_0 + A_1P + A_2P^2$ が表されます：

$$\sigma_{VM} = \sqrt{3(A_0 + A_1P + A_2P^2)} \quad (128)$$

多項式 A_0 , A_1 , A_2 の定数は以下によって決定されます：

- $F < 0$ の場合、 $J_2 < A_0 + A_1P + A_2P^2$ であり、材料は降伏曲面内で、弾性領域内にあります。
- $F = 0$ の場合、 $J_2 = A_0 + A_1P + A_2P^2$ で、材料は降伏曲面にあります。
- $F > 0$ の場合、 $J_2 > A_0 + A_1P + A_2P^2$ であり、材料は降伏曲面を越えており、破壊しています。
- $A_1 = A_2 = 0$ の場合、 $\sigma_{VM} = \sqrt{3J_2} = \sqrt{3A_0}$ であり、これはフォンミーゼス基準です。

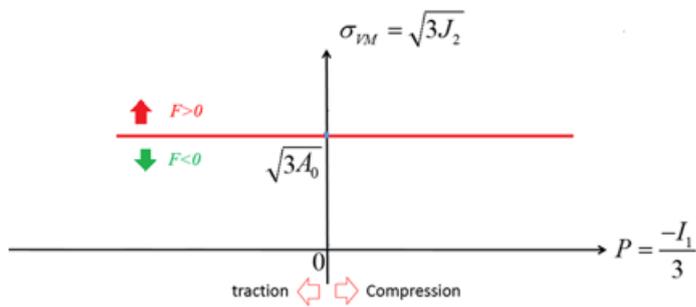


図 166:

圧力の計算

LAW10では、入力パラメータ C_0, C_1, C_2, C_3 による多項式を使用して圧力を表します。圧力は、体積ひずみの関数としてプロットできます。

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \tag{129}$$

- $P_{ext} = 0$ の場合、圧力は $P = \Delta P$ であり、圧力限界は $P_{min} = \Delta P_{min}$ です。

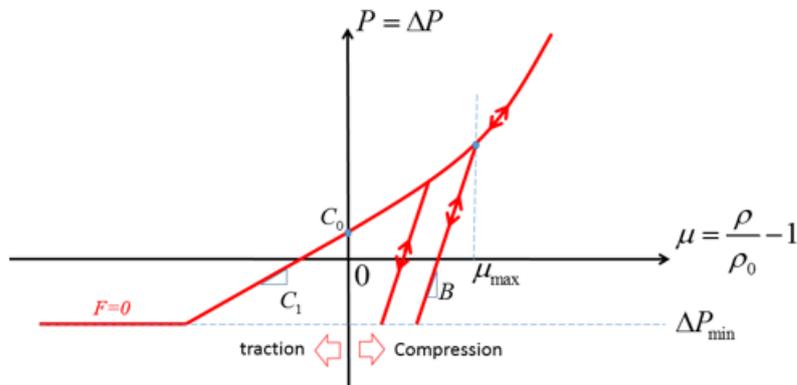


図 167: 外部圧力なしの圧力曲線

- $P_{ext} \neq 0$ の場合、圧力は P_{ext} だけシフトされ、 $P = P_{ext} + \Delta P$ となり、圧力限界は $P_{min} = P_{ext} + \Delta P_{min}$ となります。

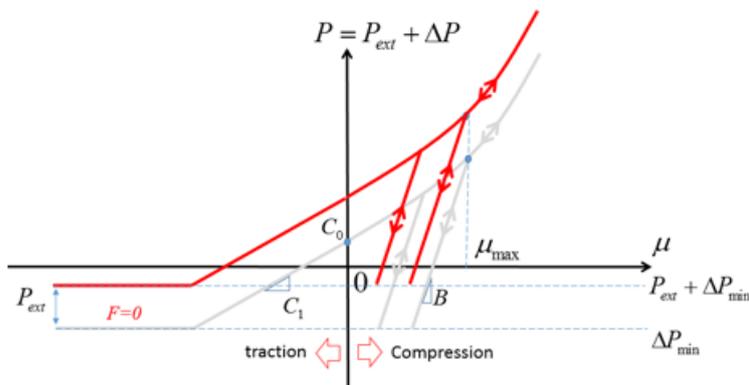


図 168: 外部圧力ありの圧力曲線

ここで、

$$\Delta P = \begin{cases} \max\{\Delta P_{\min}, C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3\} & \text{if } \mu \geq 0 \text{ compression} \\ \max\{\Delta P_{\min}, C_0 + C_1\mu\} & \text{if } \mu < 0 \text{ traction} \end{cases} \quad (130)$$

- 引張では、圧力は線形であり、 ΔP_{\min} によって制限されます。
- 圧縮では、圧力は非線形であり、 ΔP_{\min} によって制限されます。

材料則間の唯一の違いは、LAW10では、材料定数 C_0, C_1, C_2, C_3 を使用して圧力と体積ひずみの関係 ($P - \mu$ 曲線) を表す点です。LAW21では、関数入力 fct_ID_f により、この曲線を表すことができます。

载荷と除荷

LAW10とLAW21では、パラメータ μ_{\max} および B を使用することで、 $P - \mu$ 曲線の異なる载荷および除荷経路を考慮できます。

- 引張の場合 ($\mu < 0$)
 - LAW10では、 $P = C_1\mu$ により線形载荷および除荷 (図 167)。
 - LAW21では、入力関数 fct_ID_f を使用して载荷が定義され、 $P = K_t\mu$ で線形除荷が定義されます。
- 圧縮の場合 ($\mu > 0$)、LAW10とLAW21に共通：
 - B も μ_{\max} も定義されていない場合、载荷経路と除荷経路は同じです。

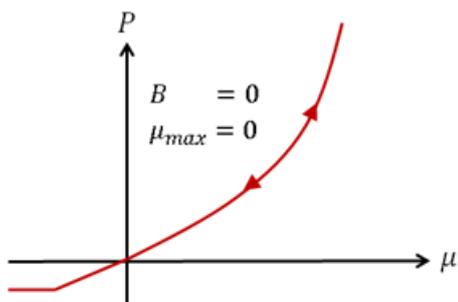


図 169: LAW10とLAW21で同一の载荷と除荷

◦ Bまたは μ_{max} のいずれかが定義されている場合:

1. Bのみが定義されている場合、 μ_{max} は体積ひずみであり、 $P - \mu$ 曲線の接線は $B(B = \left. \frac{dP}{d\mu} \right|_{\mu_{max}})$ と等しくなります。
2. μ_{max} のみが設定されている場合、Bは、 μ_{max} における $P - \mu$ 曲線の接線です。圧縮時の載荷と除荷は次のとおりです:
 - ・ $\mu > \mu_{max}$ の場合、載荷と除荷の経路は同じです。
 - ・ $\mu < \mu_{max}$ の場合、載荷と除荷の経路は異なり、これは勾配Bの線形除荷です。

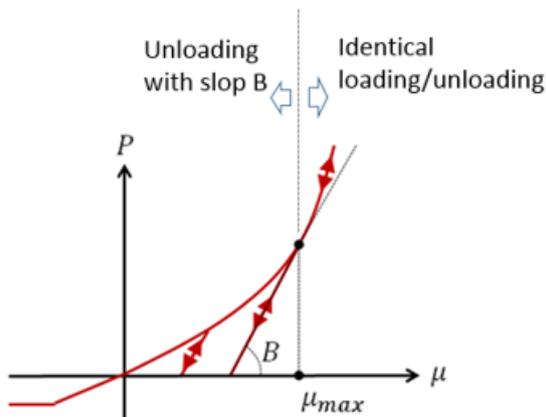


図 170: LAW10とLAW21の異なる載荷と除荷の処理

コンクリート材料(/MAT/LAW24)

鉄筋コンクリート材料をモデル化するには、降伏におけるcapの有無によらず、LAW24でDrucker-Prager基準を使用します。この材料則では、コンクリート材料の破壊メカニズムとして引張亀裂と圧縮破砕の2つを想定しています。

コンクリートの引張挙動

LAW24では、引張時に、オプション H_t 、 D_{sup} 、および ϵ_{max} を使用して、引張亀裂と引張破壊を表すことができます。

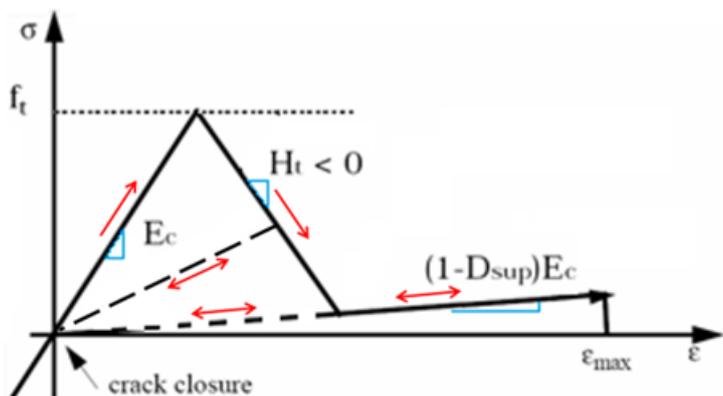


図 171: LAW24引張荷重

初期の非常に小さな弾性相においては、材料は弾性係数 E_c を有します。

引張強度 f_t に達すると、コンクリートは H_t の勾配で軟化し始めます。最大損傷係数 D_{sup} は、亀裂中および亀裂後の残留剛性のモデル化を可能にするため重要です。

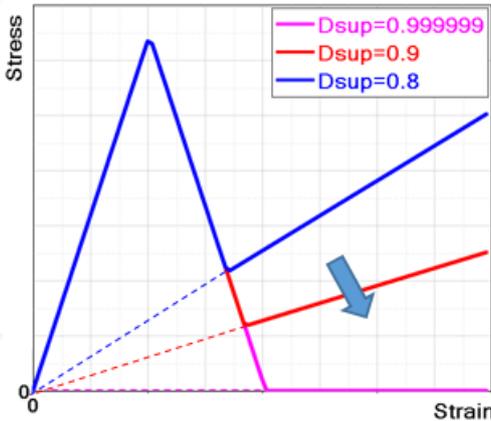


図 172: 最大損傷係数の影響

残留剛性は次のように計算されます：

$$E = (1 - D_{sup}) \cdot E_c \quad (131)$$

亀裂閉口が生じると、コンクリートは再度弾性となり、(各方向の)損傷係数は維持されます。

引張におけるコンクリートの支持力は、圧縮における支持力よりはるかに小さくなります。引張では、通常これは弾性と見なされます。

損傷の端における現在の剛性を最小化し、それによって引張における残留応力を回避するため、1に近い D_{sup} 値(デフォルトでは0.999999)を選択することをお勧めします。残留応力は、引張による要素の変形が非常に大きい場合、かなり大きくなる場合があります。これは、損傷の原因になった力が残存している場合に発生します。

繊維によって補強されたコンクリートの挙動をシミュレートし、フィッティングするには、 D_{sup} (および H_t)を調整することができます。全破壊ひずみ ϵ_{max} に達すると、コンクリート材料は破壊します。

圧縮におけるコンクリートの降伏曲面

コンクリートの場合、降伏曲面は、破壊曲面 r_f と降伏曲面の間である塑性硬化ゾーンの始まりです。

降伏曲面は、引張ゾーンでの破壊曲面と同じと見なされます。圧縮では、降伏曲面が係数 $k(\sigma_m, k_0)$ を使用して破壊曲面にスケールダウンされます。コンクリートのLAW24での降伏は、以下のとおりです：

$$f = \frac{r}{J_2} - \frac{k(\sigma_m, k_0) \cdot r_f}{I_1^{part}} = 0 \quad (132)$$

- $I_{cap} = 0$ または1(降伏におけるcapなし)の場合、降伏曲線は以下のようになります：

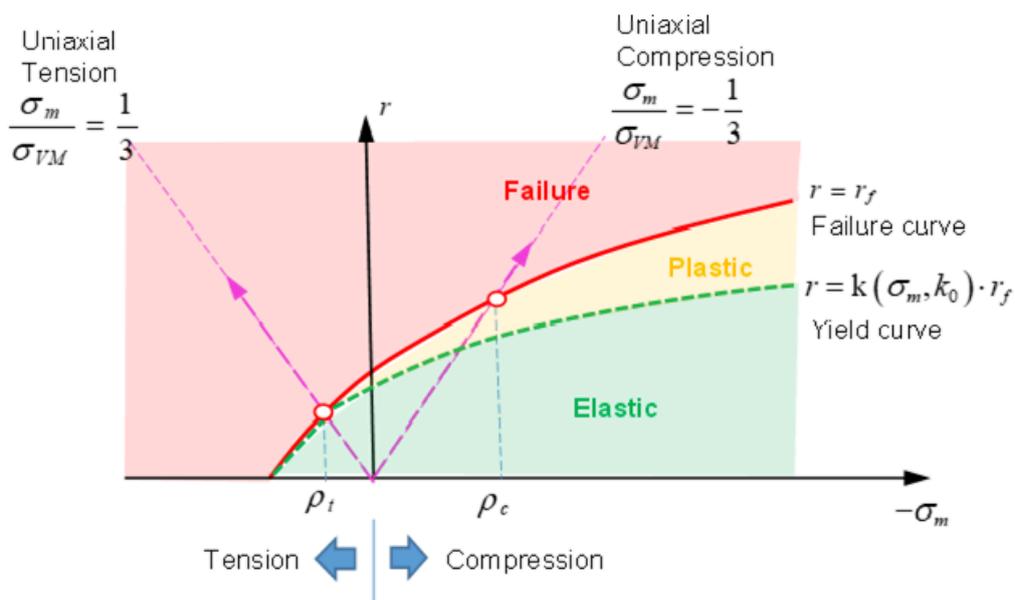


図 173: 降伏におけるcapなしでのDrucker-Prager基準

- $I_{cap} = 2$ (降伏におけるcapあり) の場合、降伏は以下ようになります:

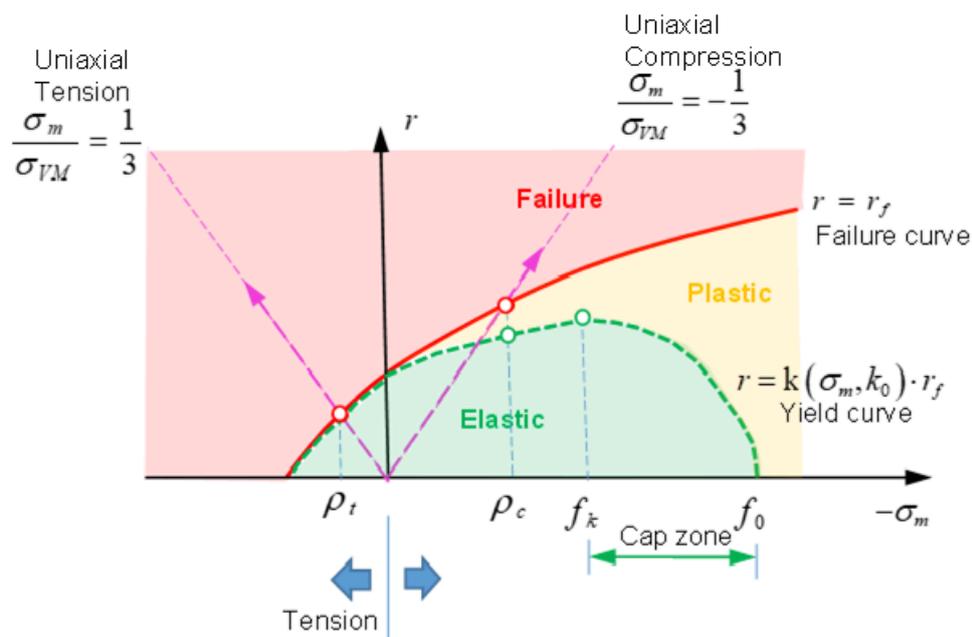


図 174: 降伏におけるcapありでのDrucker-Prager基準

$r < k(\sigma_m, k_0) \cdot r_f$ (図 174の緑色の領域)

材料は弾性相に属し、降伏には達していません。

$r \geq r_f$ (図 174の赤色の領域)

材料は破壊されています。

$$k(\sigma_m, k_0) \cdot r_f < r < r_f \text{ (図 174の黄色の領域)}$$

材料は、降伏曲面より上で破壊曲面より下の、塑性硬化相に属しています。

入力パラメータ ρ_t は単軸引張試験における破壊静水圧、 ρ_c は単軸圧縮試験における破壊時の静水圧です。

スケールファクター $k(\sigma_m, k_0)$ は、平均応力 σ_m の関数であり、以下のように表すことができます：

- $\sigma_m \geq \rho_t$ (引張) の場合、スケールファクターは $k(\sigma_m, k_0) = 1$ です。この場合、降伏曲面は破壊曲面と等しくなります：
 $r = r_f$

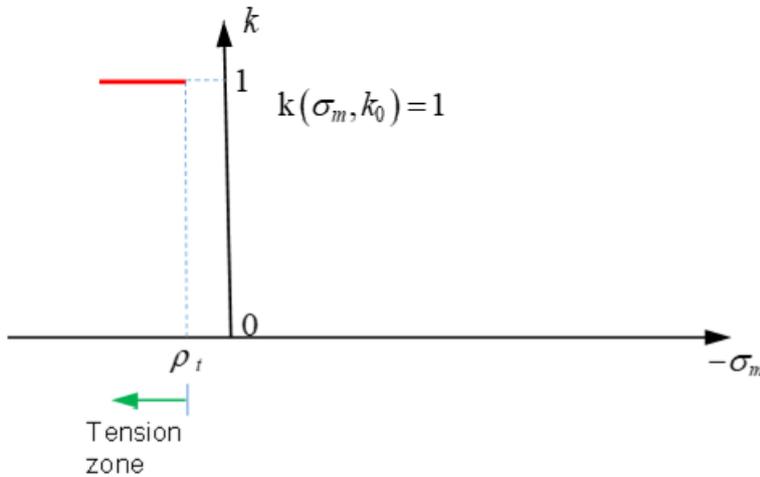


図 175: k (引張ゾーンにおける)

- 引張-圧縮領域において、 $\rho_t > \sigma_m \geq \rho_c$ の場合、

$$k(\sigma_m, k_0) = 1 + \frac{(1 - k_0) \cdot [\rho_t(2\rho_c - \rho_t) - 2\rho_c\sigma_m + \sigma_m^2]}{(\rho_c - \rho_t)^2} \text{ ここで、 } k_y \leq k_0 \leq 1$$

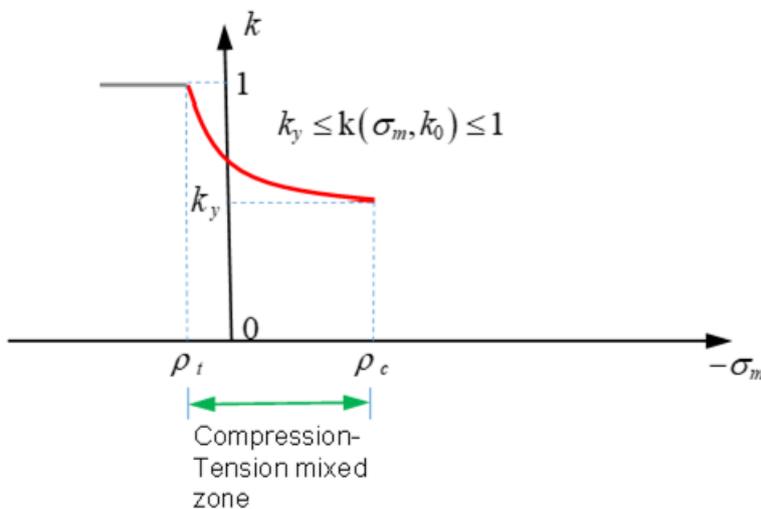


図 176: k 圧縮-引張混合ゾーンでの関数

- 曲線の残りは、 I_{cap} オプションに依存し、異なるスケールファクター $k(\sigma_m, k_0)$ が使用されます。
 - $I_{cap} = 0$ または1、かつ $\sigma_m < \rho_c$ (圧縮)の場合、 $k(\sigma_m, k_0) = k_y$

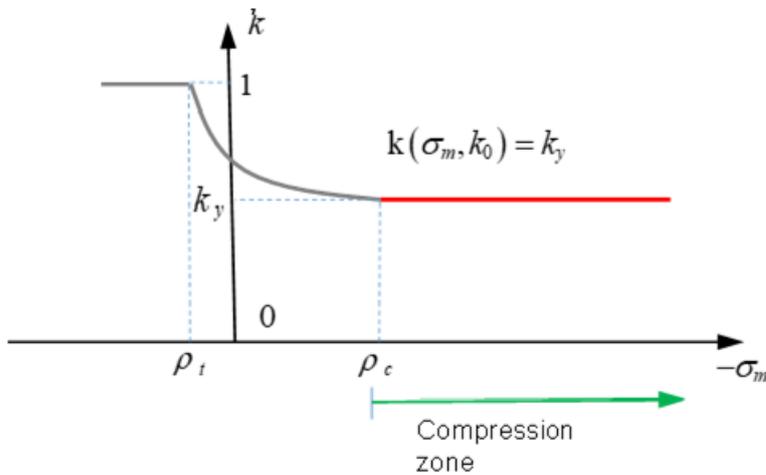


図 177: k 圧縮ゾーンでの関数

- $I_{cap} = 2$ (降伏におけるcapあり)、かつ $\rho_c < \sigma_m < f_k$ (圧縮)の場合、 $k(\sigma_m, k_0) = k_y$

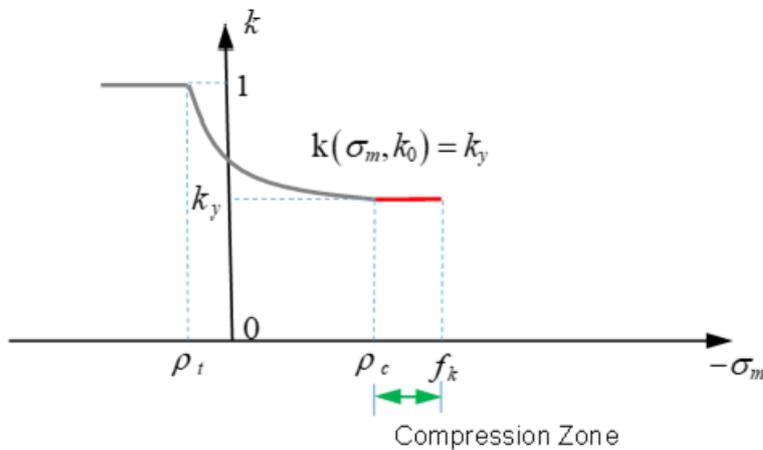


図 178: k capなしのDrucker-Prager基準の関数

- $f_k < \sigma_m < f_0$ (capゾーン内)において、

$$k(\sigma_m, k_0) = k_0 \left[1 - \left(\frac{\sigma_m - f_k}{f_0 - f_k} \right)^2 \right] \quad \text{ここで、} 0 \leq k_0 \leq k_y$$

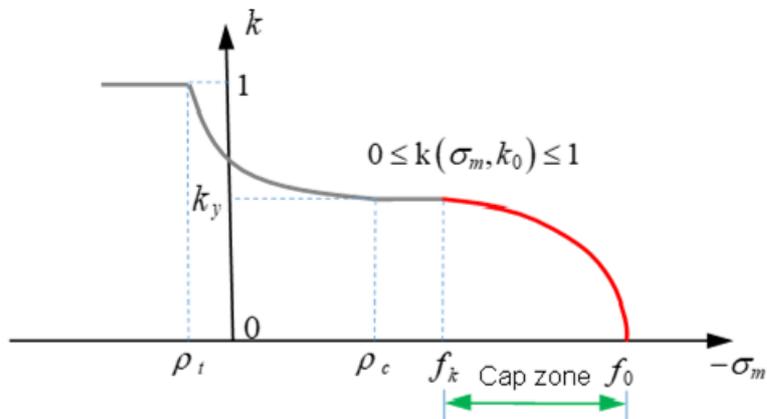


図 179: k capありのDrucker-Prager基準の関数

材料定数 k_y は、 $0 \leq k_y \leq 1$ である必要があります。大きな値の k_y では、降伏曲面がより高くなります。

例えば $I_{cap} = 2$ (capのある降伏)の場合、 $k_y = 0.8$ と $k_y = 0.6$ の降伏曲面の違い(図 180)。LAW24における k_y のデフォルト値は0.5です。

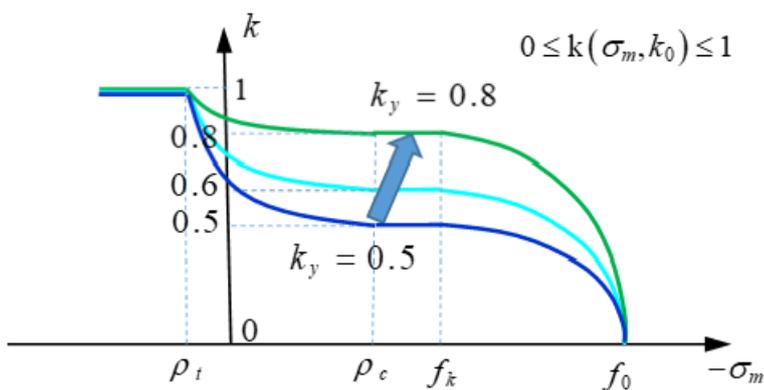


図 180: 異なる k 関数値の影響

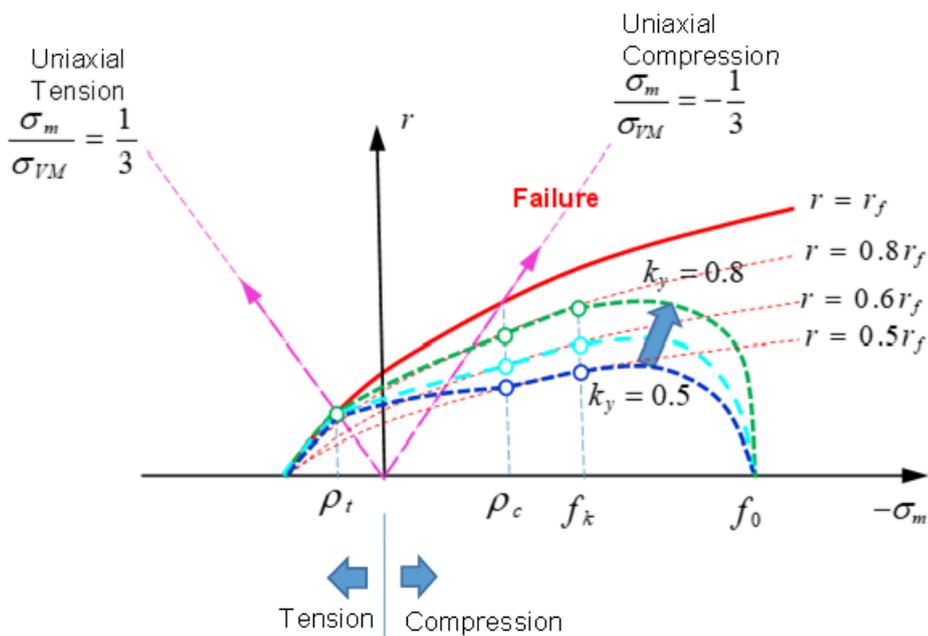


図 181: 異なる k 関数値によるDrucker-Prager基準

圧縮におけるコンクリートの塑性流れ則

非関連塑性流れ則はLAW24で使用されます。塑性流れ則は以下のとおりです：

$$g = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} \quad (133)$$

ここで、

α 塑性域のダイラタンシー。

$\alpha = \frac{\partial g}{\partial I_1}$ 体積塑性流れを制御します。

I_1 第1応力不変量(静水圧)。

実験に基づいて、 α は、 k_0 の線形関数です：

$$\alpha = \frac{(1 - k_0)\alpha_y + (k_0 - K_y)\alpha_f}{1 - K_y} \quad (134)$$

次の場合； $k_0 = K_y$ $\alpha = \alpha_y$ となり、材料が降伏していることを意味します。

次の場合； $k_0 < K_y$ α は、cap領域で負となります。

次の場合； $k_0 = 1$ $\alpha = \alpha_f$ となり、材料が破壊されていることを意味します。

α_y , α_f の値は、降伏点を超え、破壊前の材料を表すために使用されます。LAW24では、 α_y , α_f に-0.2および-0.1を使用することをお勧めします。 α_y , α_f に非常に小さな値が使用されると、体積塑性はなくなります(cap領域なし)。

圧縮におけるコンクリートの圧壊

破壊サーフェスは次のように与えられます：

$$f = r - r_f(\sigma_m, \theta) = 0 \tag{135}$$

ここで、 $r = \sqrt{2J_2} / f_c$, $\sigma_m = I_1 / 3f_c$ と θ はLoad角で、次のようになります：

$$\cos 3\theta = \frac{J_3}{2} \left(\frac{3}{J_2} \right)^{3/2} \tag{136}$$

このサーフェスを構築するためにOttosenサーフェスが作成されます：

$$r_f(\sigma_m, \theta) = \frac{1}{a} \left(-b + \sqrt{b^2 - a(\sigma_m - c)} \right) \tag{137}$$

ここで、 a 、 b_c 、 b_t および c がサーフェスを形成する4つの値で、

$$b(b_c, b_t, \theta) = \frac{1}{2} [b_c(1 - \cos 3\theta) + b_t(1 + \cos 3\theta)] \tag{138}$$

コンクリートの場合、圧縮破壊曲線 r_f は、以下の強度で定義できます。

f_t	単軸引張(軸性は1/3)
f_c	単軸圧縮(軸性は-1/3)
f_b	2軸圧縮(軸性は-2/3)
f_2	拘束圧縮強度(3軸試験)
s_0	拘束圧

3D破壊エンベロープをすべて特定する最善の方法は、 f_c 、 f_t 、 f_b 、 f_2 、 s_0 のすべての値の実験データを取得する方法です。これを図 182に図式的に示します。

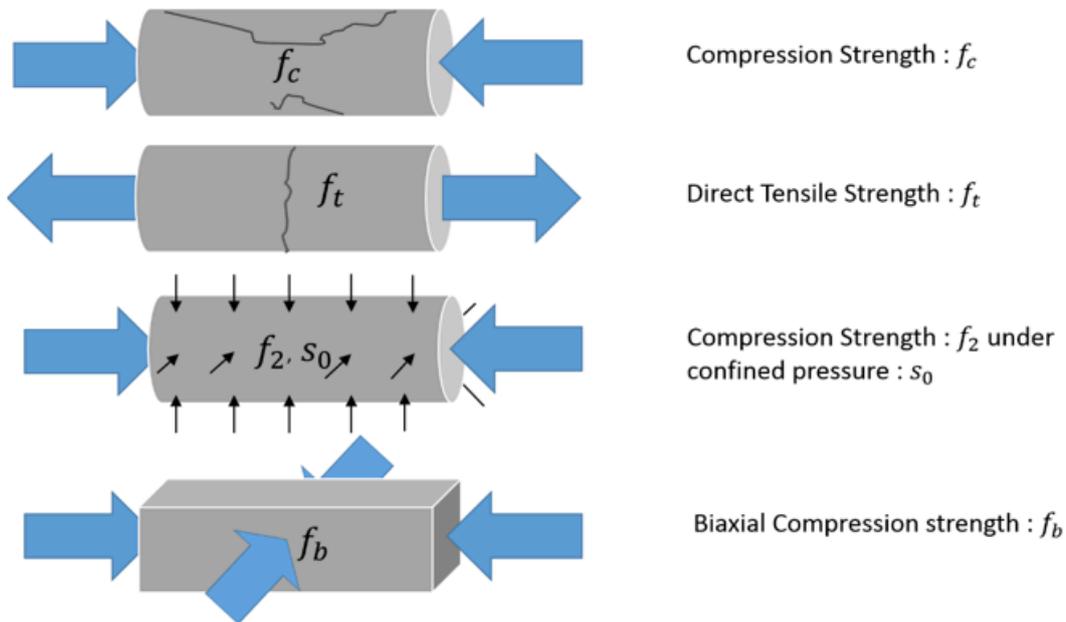


図 182: 3D破壊エンベロープをすべて特定する破壊パラメータ

表 17: 4つの実験からの入力

荷重タイプ	サーフェスポイント	デフォルト入力	基準 r	圧力 σ_m	Lode角 θ
圧縮	$(f_c, 0, 0)$	必須	$r = \sqrt{2/3}$	$\sigma_m = -1/3$	$\cos\theta = -1$
直接引っ張り	$(f_t, 0, 0)$	$f_t = 0.1f_c$	$r = \sqrt{2/3} \left(\frac{f_t}{f_c} \right)$	$\sigma_m = 1 \left 3 \left(\frac{f_t}{f_c} \right) \right $	$\cos\theta = 1$
2軸圧縮	(f_2, s_0, s_0)	$I_{cap} = 1$ であれば、 $f_2 = 4.0f_c$ $I_{cap} = 2$ であれば、 $f_2 = 7.0f_c$ $s_0 = 1.25f_c$	$r = \sqrt{2/3} \left(\frac{f_t}{f_c} \right) \sigma_m$	$\sigma_m = 2 \left 3 \left(\frac{f_t}{f_c} \right) \right $	$\cos\theta = 1$
拘束圧力の下での圧縮強度	$(f_b, f_b, 0)$	$f_b = 1.2f_c$	$r = \sqrt{2/3} \frac{f_2 - s_0}{f_c}$	$\sigma_m = \frac{f_2 + 2s_0}{3f_c}$	$\cos\theta = -1$

図 183 と図 184は、破壊サーフェスを決定するポイントを示しています。

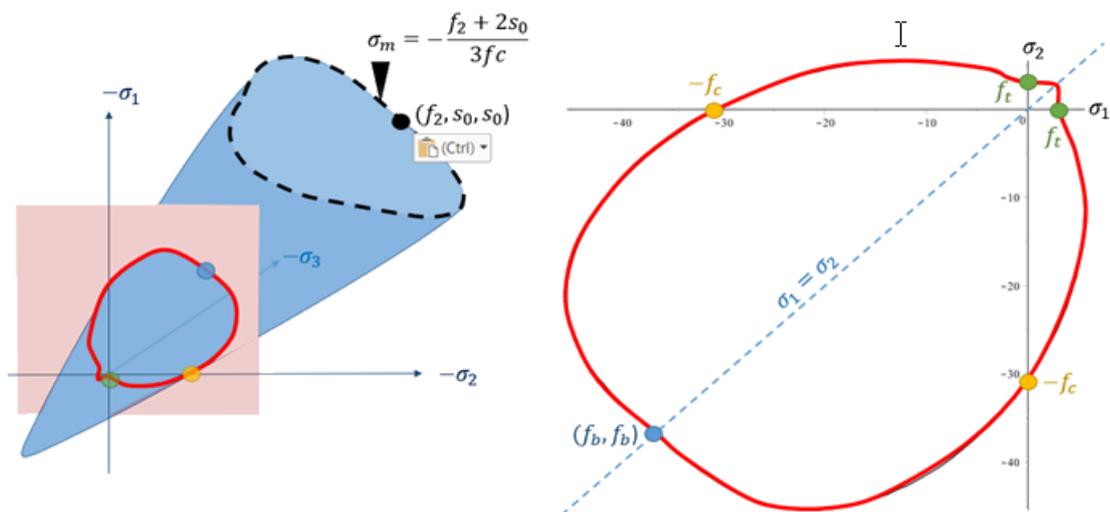


図 183: 平坦な応力面を有する破壊サーフェスのトレース

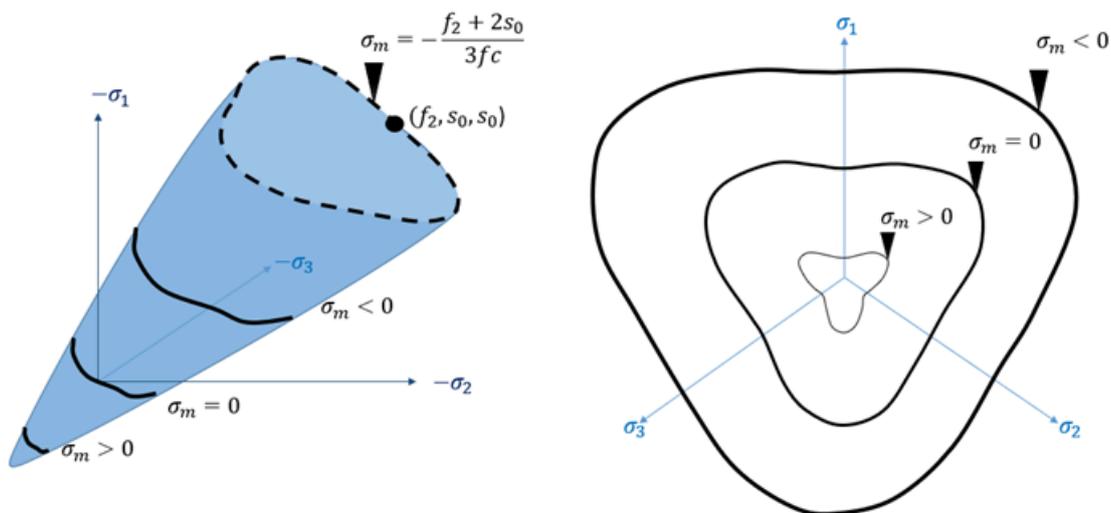


図 184: 静水圧軸に垂直な複数の断面を有する破壊トレース

これらのプロットから、破壊エンベロープが凸型サーフェスではないことがわかります。図 185 はこの挙動を示しています。

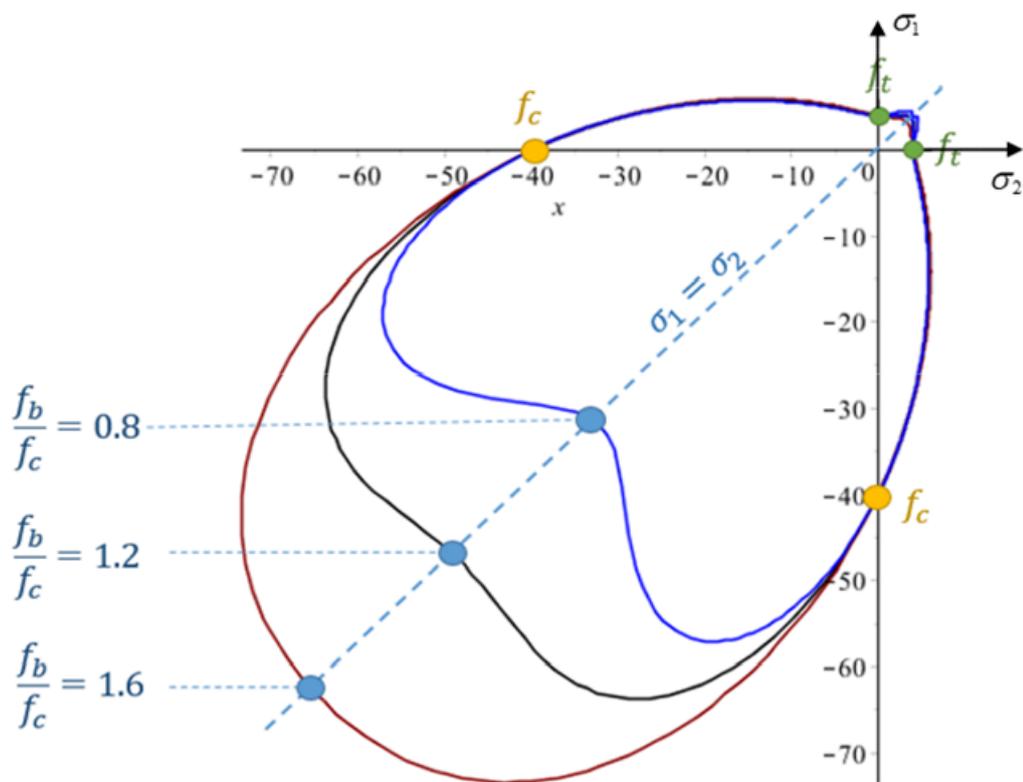


図 185: 2軸圧縮強度値の影響: 作用点以外の、特性に影響するすべての破壊点を固定した状態

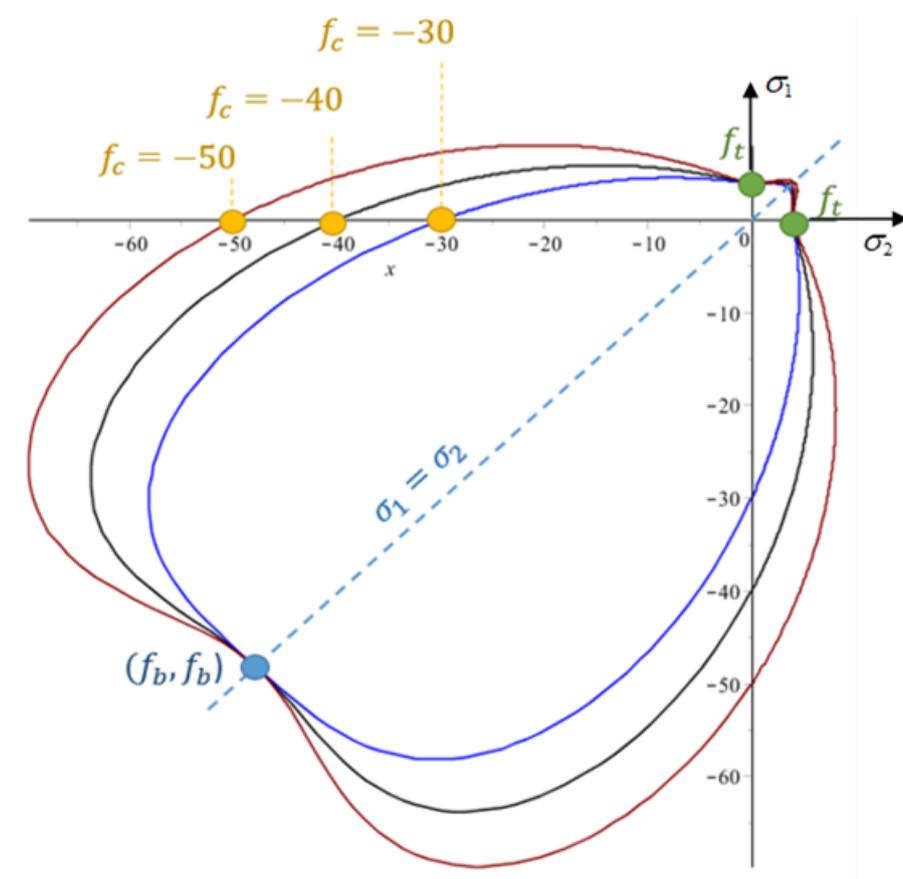


図 186: 圧縮強度値の影響: 作用点以外の、特性に影響するすべての破壊点を固定した状態

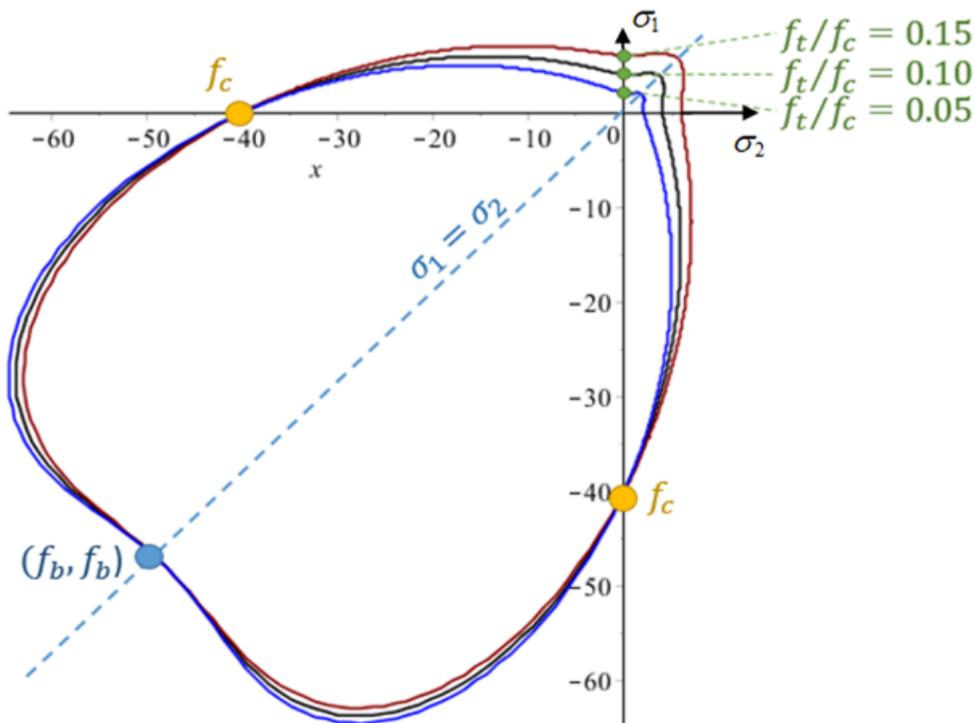


図 187: 引張強度値の影響: 作用点以外の、特性に影響するすべての破壊点を固定した状態

この特定のケースにおいては、圧縮強度は変化していますが、 f_t/f_c 、 f_b/f_c 、 f_2/f_c 、 s_0/f_c といったその他すべての比率は固定されています。これにより、図 188 のようなエンベロップスケールリングが生じます。

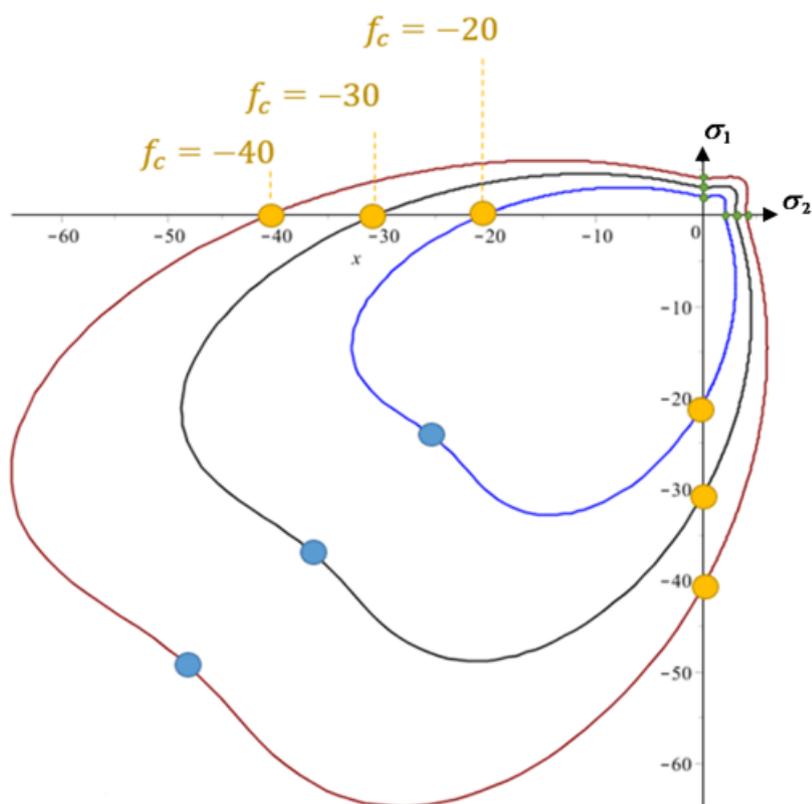


図 188: 圧縮強度値の影響
他のすべての比率は固定。

ここでは、LAW24と同じ強度を使用していますが、拘束圧縮強度 f_2 には異なる値を使用しています。

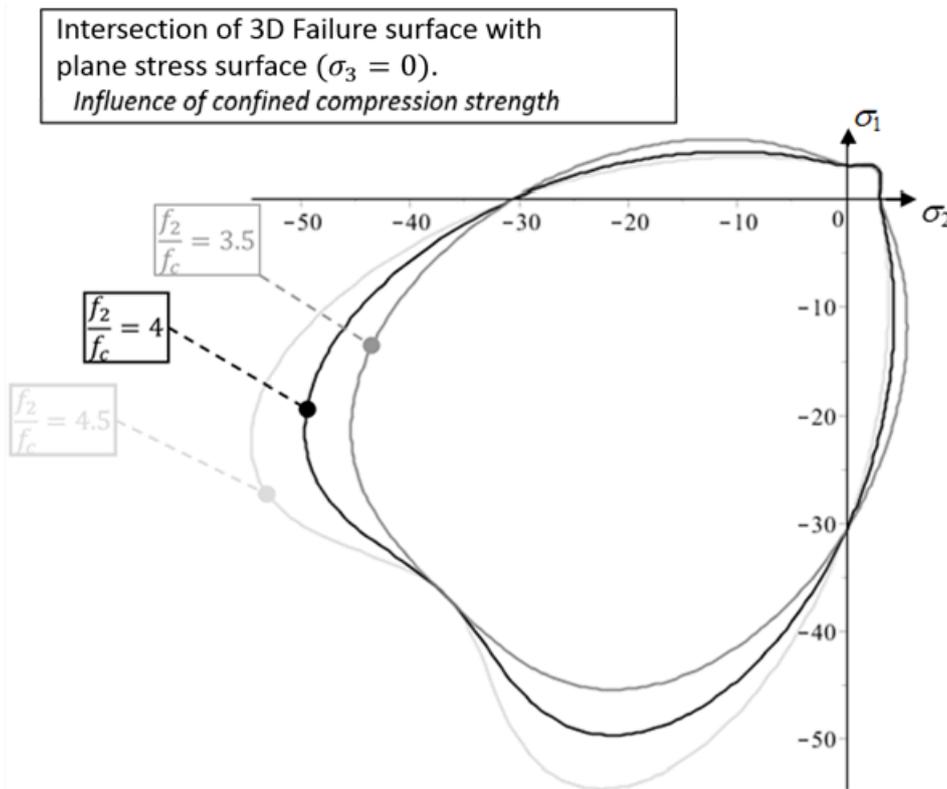


図 189: 3軸破壊点★の影響を受ける平坦な応力面上の破壊エンベロープ $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = (f_2, s_0, s_0)$

f_c 、およびコンクリート破壊の定義に使用する $r - \sigma_m$ 空間での比率 f_t/f_c 、and f_b/f_c は次のようになります:

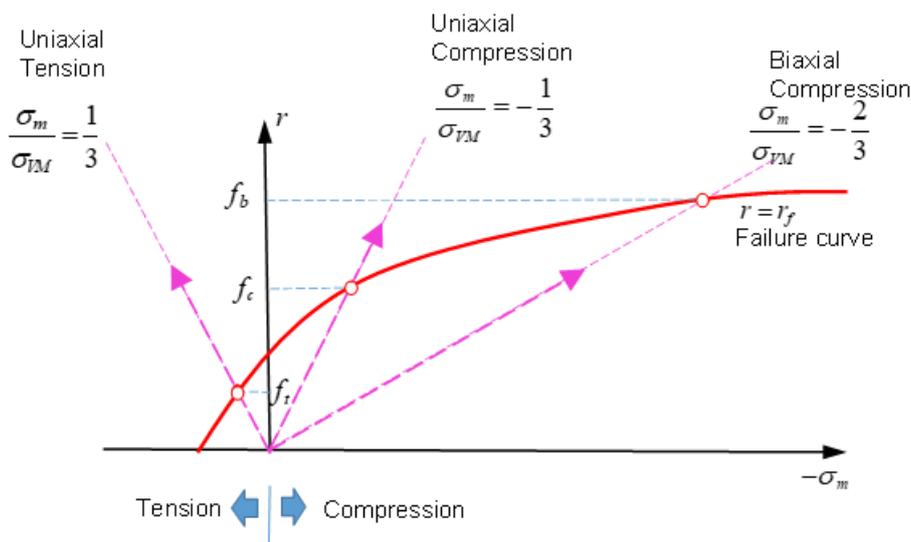


図 190: 破壊曲線を決定するための各種試験(単軸引張、単軸圧縮、および2軸圧縮)

ここで、破壊曲線は、 $r = \sqrt{2J_2} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_{VM}$ を使用して定義され、 $\sigma_m = \frac{I_1}{3}$ は平均応力(圧力)、 I_1 および J_2 は第1および第2応力不変量です。

破壊曲線 r_f に達すると、材料は破壊します。

コンクリートの補強

Radiossでは、2つの方法でコンクリートの補強をシミュレートできます。

- 1つは、ビームまたはトラス要素を複数の運動条件でコンクリートに結合する方法です。
- もう1つは、LAW24のパラメータを直交異方性ソリッドプロパティ/PROP/TYPE6とともに使用し、補強方向を定義する方法です。LAW24のパラメータ α_1 , α_2 , α_3 を使用して、方向1、2、3について、全体のコンクリート断面積に対する補強断面積の比率を定義します。

$$\alpha_i = \frac{Area_{steel}}{Area_{concrete}} \quad (139)$$

ここで、 σ_y は、補強の降伏応力です。補強としてスチールが使用される場合は、 σ_y がスチールの降伏応力で、 E_t が塑性相におけるスチールの弾性率です。

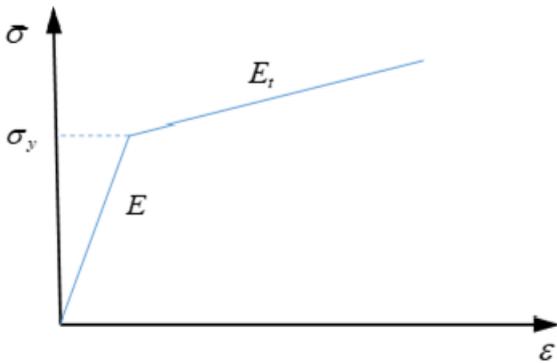


図 191: 補強(スチール)の応力-ひずみ曲線

コンクリート材料(/MAT/LAW81)

LAW81は岩石またはコンクリート材料のモデル化に使用できます。

Drucker-Prager降伏基準

LAW81ではDrucker-Prager降伏基準を使用します。ここでは、降伏曲面と破壊曲面が同じです。降伏基準は以下のとおりです:

$$F = \frac{q}{J_2 \text{ part}} - r_c(p) \cdot \frac{(p \tan \phi + c)}{I_1 \text{ part}} = 0 \quad (140)$$

ここで、

q 以下の条件におけるvon Mises応力: $q = \sigma_{VM} = \sqrt{3J_2}$

p 圧力は以下のように定義されます: $p = \frac{1}{3}I_1$

12. Han, D. J., and Wai-Fah Chen. "A nonuniform hardening plasticity model for concrete materials." *Mechanics of materials* 4, no. 3-4 (1985): 283-302

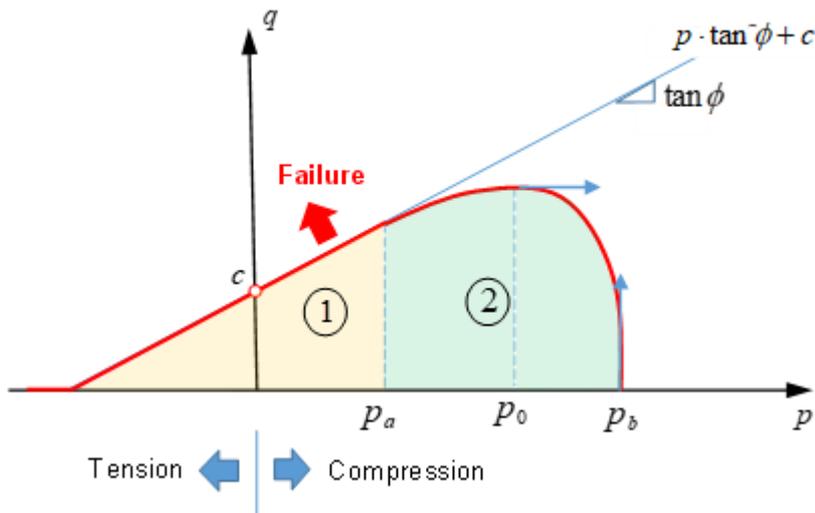


図 192: 降伏曲面 (LAW81)

降伏曲面は2つの部分で表されます:

- 線形部分① ($p \leq p_a$)、ここではスケール関数が $r_c(p) = 1$ で、von Mises応力が圧力に線形比例します:

$$q = p \tan \phi + c \quad (141)$$

ここで、

c

粘度。せん断強度による降伏エンベロープを制限します。

$c = 0$ の場合、材料に引張強度はありません。

ϕ

内部摩擦の角度。降伏エンベロープの勾配を定義します。

c および ϕ は、Mohr-Coulomb降伏曲面の定義にも使用されます。Drucker-Prager降伏曲面は、Mohr-Coulomb降伏曲面を滑らかにしたものです。

- 降伏曲面の2つ目の部分② ($p_a < p < p_b$) は、cap制限をシミュレートします。岩石またはコンクリート材料での圧力の増加により、材料の降伏が増加しますが、圧力が十分に大きくなると、岩石またはコンクリート材料は圧壊されます。cap制限のあるDrucker-Pragerモデルを使用して、この挙動をモデル化できます。cap制限は②の部分で定義され、以下のスケール関数を使用します:

$$r_c(p) = \sqrt{1 - \left(\frac{p - p_a}{p_b - p_a} \right)^2} \quad (142)$$

von Mises応力は以下ようになります:

$$q = \sqrt{1 - \left(\frac{p - p_a}{p_b - p_a} \right)^2} \cdot (p \tan \phi + c) \quad (143)$$

ここで、

p_b

曲線は $fct_ID_{p_b}$ 入力を使用して定義されます。

p_a

入力 α 率の値を使用してRadiossによって計算されます。

$p_a = \alpha \cdot p_b$ ここで、 $0 < \alpha < 1$ 。

ここで、 p_0 は、降伏曲線の最大ポイントです。ここで、 $\frac{\partial F}{\partial p}(p_0) = 0$

$p = p_b$ の場合、 $r_c(p_b) = 0$ となり、降伏関数は、

$q = 0 \cdot (p \tan \phi + c) = 0$ となります。これは材料が圧壊されることを意味します。

入力パラメータ ϕ , c , p_b , α を、Drucker-Prager降伏曲面用に特定する必要があります。これらのパラメータをフィッティングさせるには、少なくとも4つの試験が必要です。最も簡単なケースでは、単軸引張と単軸圧縮を使用して、線形部分 ϕ , and c を特定できます。 p_b , and α を特定するには、2軸圧縮試験と圧縮 / 圧縮試験が必要です (RD-E:4701 Kupfer試験でのコンクリートの検証のCC00およびCC01)。

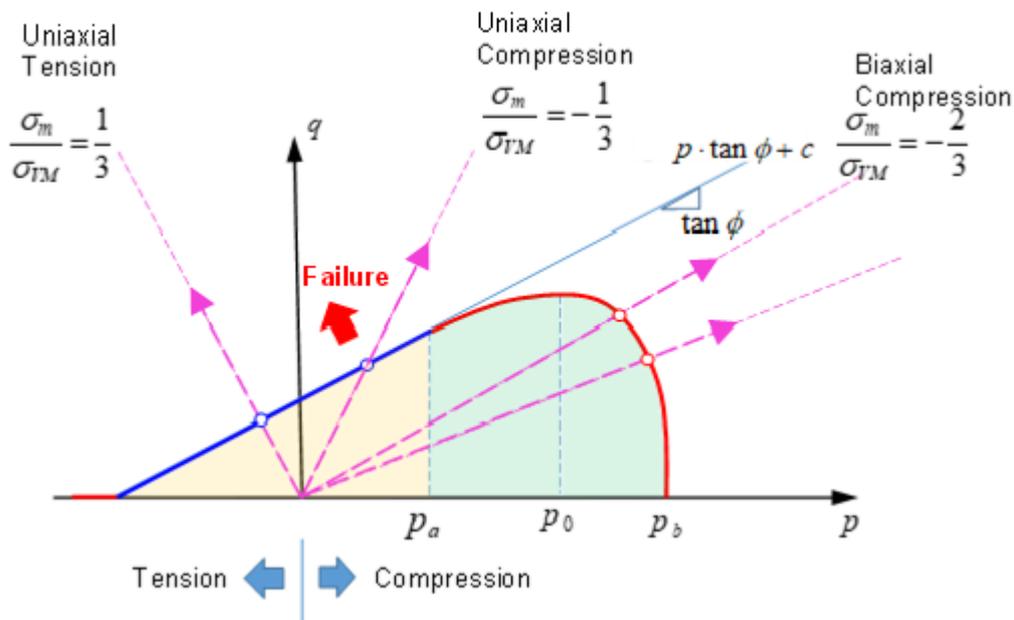


図 193: さまざまな荷重条件を示すLAW81の降伏曲面

金属など、ほとんどの材料では、塑性ひずみの増分は降伏曲面に垂直と見なすことができます。ただし、降伏曲面に垂直な塑性ひずみの増分が岩石やコンクリートの材料に使用された場合、塑性体積膨張が過大に見積もられます。したがって、非関連塑性流れ則がこれらの材料で使用されます。LAW81では、塑性流れ関数 G は次のように定義されます：

- $G = q - p \cdot \tan \psi = 0$ 、右記の場合； $p \leq p_a$
- $G = q - \tan \psi \left(p - \frac{(p - p_a)^2}{2(p_0 - p_a)} \right) = 0$ 、右記の場合； $p_a < p \leq p_0$
- $G = F$ 、右記の場合； $p > p_0$

圧力は p_0 であるため、降伏関数 F と塑性流れ関数 G は同じであり、次の条件が満たされます：

$$G(p_0) = F(p_0) \tag{144}$$

$$\frac{\partial G}{\partial p} \Big|_{p_0} = \frac{\partial F}{\partial p} \Big|_{p_0} = 0 \tag{145}$$

圧力 p_0 は、 $\frac{\partial F}{\partial p}|_{p_0} = 0$ である降伏曲面を使用して計算できます。ここで G は次のように定義されます。

$$G = q - \tan\psi \left(p - \frac{(p - p_a)^2}{2(p_0 - p_a)} \right) = 0 \quad (146)$$

パラメータ ψ は、関数内の圧力 p_0 でvon Mises応力を使用することで特定できます。

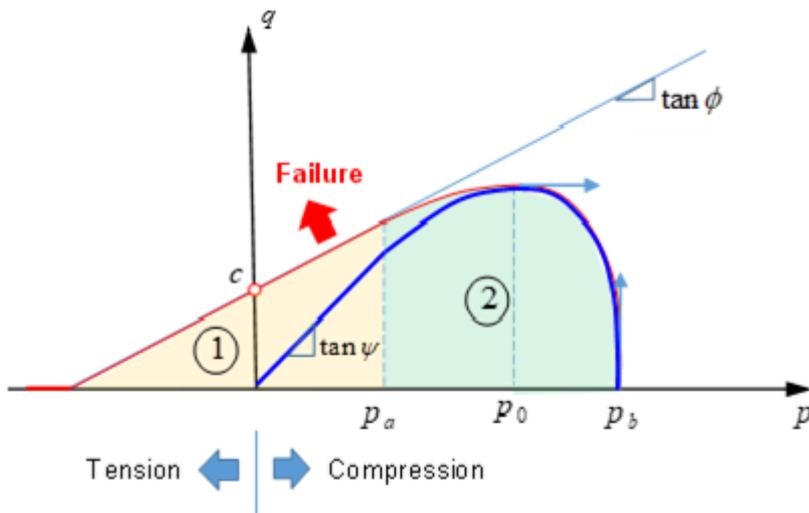


図 194: 塑性流れによるLAW81の降伏曲面

破壊

延性破壊

/FAIL/BIQUAD、/FAIL/JOHNSONおよび/FAIL/TAB1破壊モデルは、破壊における塑性ひずみを材料内の応力状態に関連付けすることによって材料の破壊を定義します。

これらの破壊モデルは、材料の延性破壊の記述によく使用されます。材料内の応力の状態は、応力の軸性を用いることで定義できます。

応力の軸性(正規化された平均応力)

延性材料については、材料の応力の状態(圧縮、せん断、引張など)が、材料の破断の際の塑性ひずみに影響します。応力の状態を表す重要かつ有益な特性である応力の軸性は、次のように定義されます:

$$\sigma^* = \frac{\sigma_m}{\sigma_{VM}} \tag{147}$$

ここで、

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad \text{平均(静水)応力}$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad \text{フォンミーゼス応力}$$

一部の共通の応力状態の軸性値は、次のように得られます:

- 純引張では:

$$\sigma_2 = \sigma_3 = 0, \text{したがって } \sigma^* = \frac{\sigma_m}{\sigma_{VM}} = \frac{1}{3}$$

- 2軸圧縮では:

$$\sigma_1 = \sigma_2, \text{および } \sigma_3 = 0, \text{したがって } \sigma^* = \frac{\sigma_m}{\sigma_{VM}} = -\frac{2}{3}$$

各種応力状態の応力軸性

応力軸性 σ^*	応力状態
$-\frac{2}{3}$	2軸圧縮
$-\frac{1}{3}$	単軸圧縮
0	純せん断
$\frac{1}{3}$	単軸引張
$\frac{1}{\sqrt{3}}$	平面ひずみ
$\frac{2}{3}$	2軸引張

/FAIL/JOHNSON

金属の延性破壊の記述には、Johnson-Cook破壊モデルがよく使用されます。これは、Johnson-Cook方程式を用いて破壊ひずみを応力軸性の関数として定義します。

Johnson-Cook破壊モデルには、破壊モデルへの3つのパートがあります；

$$\epsilon_f = \underbrace{[D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)]}_{\text{Influence of triaxiality}} \underbrace{[1 + D_4 \ln(\dot{\epsilon}^*)]}_{\text{Influence of strain rate}} \underbrace{[1 + D_5 T^*]}_{\text{Influence of temperature}} \quad (148)$$

ここで、

- ϵ_f 塑性破壊ひずみ
- $\epsilon^* = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}$ 入力参照ひずみ速度で割られた現在のひずみ速度
- T^* 材料則または/HEAT/MATで計算

ひずみ速度と温度を無視したJohnson-Cook破壊のプロットは：

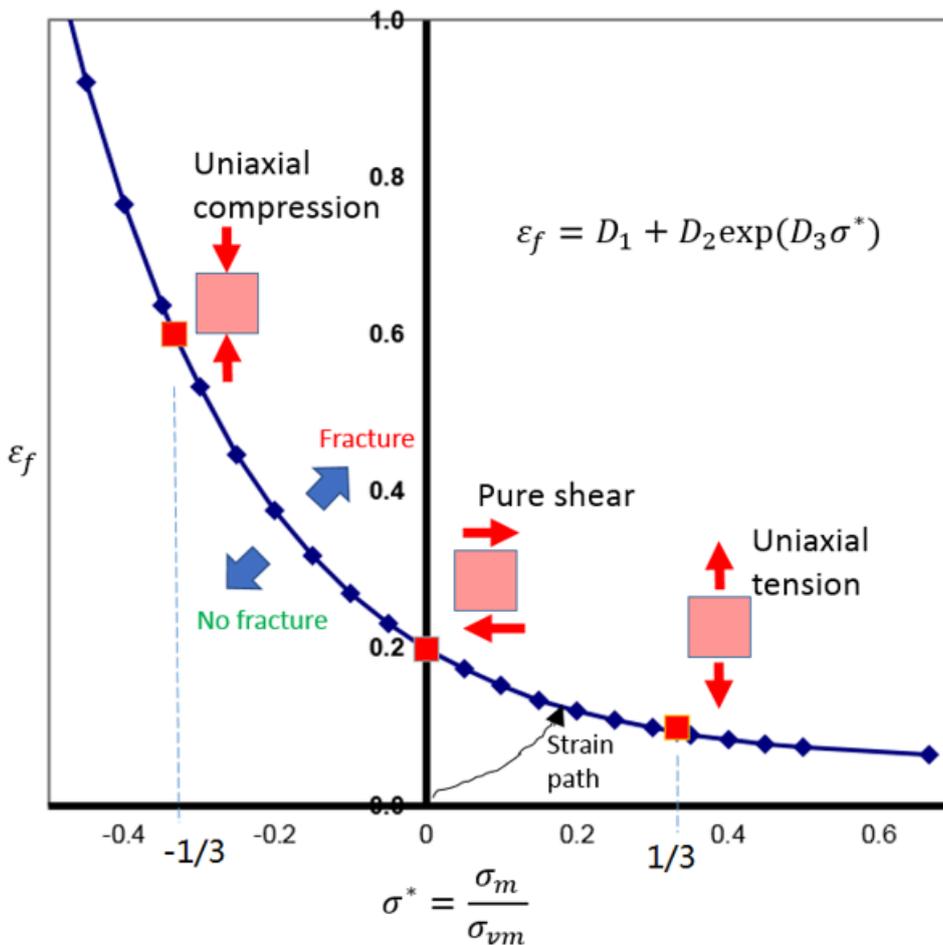


図 195: Johnson-Cook破壊モデルのプロットの例

曲線より上の塑性ひずみは材料破壊あり、曲線より下は材料破壊なしを表します。

軸性の影響のみが考慮される簡単なケースでは、破壊ひずみは：

$$\varepsilon_f = D_1 + D_2 \cdot \exp(D_3 \cdot \sigma^*) \tag{149}$$

試験からの3つの破壊データポイントを使用すると:

$$\varepsilon_f = 0.1585 \text{ (単軸引張 } (\sigma^* = 1/3) \text{ による)}$$

$$\varepsilon_f = 0.19 \text{ (純せん断 } (\sigma^* = 0) \text{ による)}$$

$$\varepsilon_f = 0.2419 \text{ (単軸圧縮 } (\sigma^* = -1/3) \text{ による)}$$

パラメータ D_1 、 D_2 および D_3 は、以下の方程式を解くことによって解析学的に計算されます:

$$\begin{cases} 0.1585 = D_1 + D_2 \cdot \exp(D_3 \cdot \frac{1}{3}) \\ 0.19 = D_1 + D_2 \cdot \exp(D_3 \cdot 0) \\ 0.2419 = D_1 + D_2 \cdot \exp(D_3 \cdot -\frac{1}{3}) \end{cases} \tag{150}$$

要素破壊処理

損傷累積法は、要素内にて発生した塑性ひずみの量を以下を用いて合計するために使用されます:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_f} \geq 1 \tag{151}$$

$D \geq 1$ が要素破壊フラグ (I_{fail_sh} と I_{fail_so}) および XFEM 定式化フラグ (I_{xfem}) の値に依存して起こること。XFEM 定式化が使用されていない際 ($I_{xfem} = 0$)、以下の表は、異なる要素破壊フラグをまとめています。

表 18: 要素破壊オプション

要素	要素破壊フラグ	次の場合; $D \geq 1$	破壊挙動
シェル	$I_{fail_sh} = 1$ (デフォルト)	1 IP または層で	削除される要素
シェル	$I_{fail_sh} = 2$	1 IP または層で	応力テンソルは IP または層でゼロに設定
シェル	$I_{fail_sh} = 2$	すべての IP または層で	削除される要素
ソリッド	$I_{fail_sh} = 1$ (デフォルト)	1 IP で	削除される要素
ソリッド	$I_{fail_sh} = 2$	1 IP で	応力テンソルは IP でゼロに設定
ソリッド	$I_{fail_sh} = 2$	すべての IP	応力テンソルは要素でゼロに設定

XFEM 定式化 ($I_{xfem} = 1$) の詳細は、/FAIL/JOHNSON に見つかります。

損傷 D は、/ANIM/SHELL/DAMA または /ANIM/BRICK/DAMA を使ってアニメーションファイル内でプロットすることができます。これは、材料損傷のリスクを示します。

/FAIL/BIQUAD

Radiossでは、/FAIL/BIQUADが延性材料用最もユーザーフレンドリーな破壊モデルです。この破壊モデルは、ひずみベースの簡易化された非線形破壊基準を線形損傷累積と共に使用します。

破壊ひずみは、5つまでのユーザー入力破壊ひずみから曲線のフィッティングを用いて計算された2つの放物線関数によって記述されます。

デフォルトでは、/FAIL/BIQUAD(S-Flag=1)は2つの放物曲線を用いて塑性破壊ひずみ ϵ_f を応力軸性 σ^* の関数として表現します。2つの放物曲線は下記を使用します：

$$f_1(x) = ax^2 + bx + c \tag{152}$$

$$f_2(x) = dx^2 + ex + f \tag{153}$$

ここで、

a, b, c, d, e, f 放物線係数

x 応力軸性

$f_1(x)$ および $f_2(x)$ 塑性破壊ひずみ

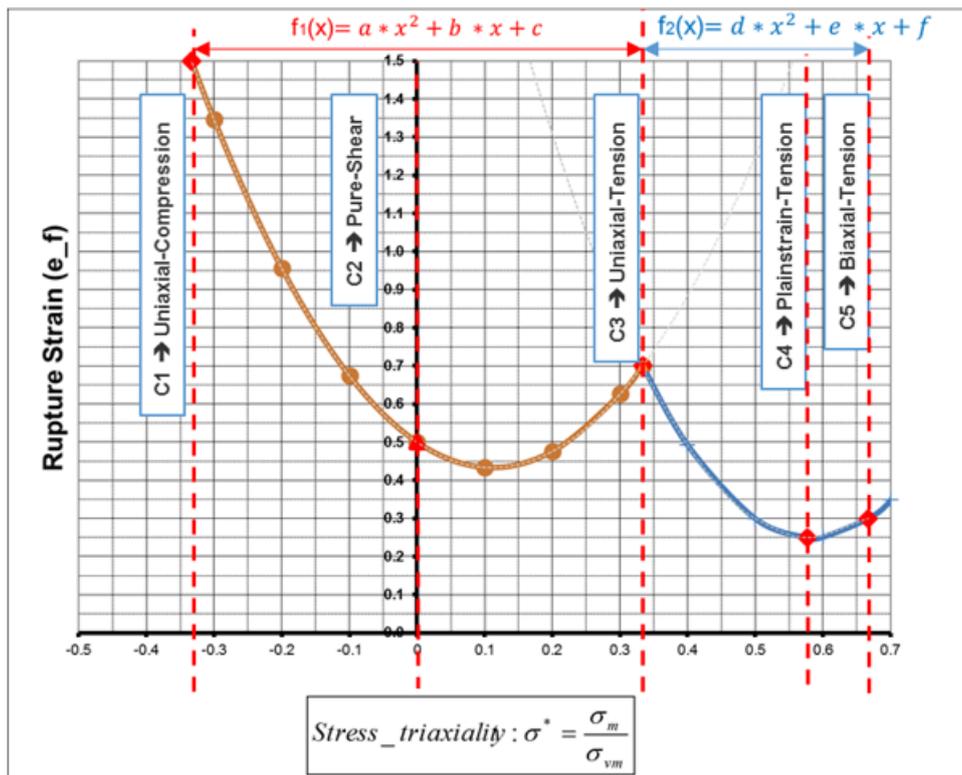


図 196: 2つの放物線から成る/FAIL/BIQUAD破壊ひずみ曲線

放物線係数 a, b, c, d, e, f は、塑性破壊ひずみ $c1-c5$ 入力値に基づいた曲線フィッティングを用いてRadiossによって計算されます。計算された放物線破壊ひずみ曲線は負の破壊ひずみ値を有します。これらの負の値は1E-6の破壊ひずみによって置き換えられ、これは、非常に大きな損傷累積と脆性の挙動をもたらします。曲線フィッティングの結果は、Starter*0000.outファイルにあります。

Bi-Quadratic FAILURE

```

c1. . . . . = 0.2419E+00
c2. . . . . = 0.1900E+00
c3. . . . . = 0.1585E+00
c4. . . . . = 0.1437E+00
c5. . . . . = 0.1394E+00

COEFFICIENTS OF FIRST PARABOLA
-----
a . . . . . = 0.9180E-01
b . . . . . = -0.1251E+00
c . . . . . = 0.1900E+00

COEFFICIENTS OF SECOND PARABOLA
-----
d . . . . . = 0.3753E-01
e . . . . . = -0.9483E-01
f . . . . . = 0.1859E+00

```

$c1-c5$ 塑性破壊ひずみ定義は:

c1	単軸圧縮の塑性破壊ひずみ
c2	せん断の塑性破壊ひずみ
c3	単軸引張の塑性破壊ひずみ
c4	平面ひずみ引張の塑性破壊ひずみ
c5	2軸引張の塑性破壊ひずみ

M-Flag入力オプション

M-Flag入力オプションに応じて、 $c1-c5$ 値の定義には3つの異なる方法があります。

- $M-Flag=0$ 、ユーザー定義の試験データ
このケースでは、5つの異なる応力状態について塑性破壊ひずみを表す $c1-c5$ を、ユーザーが入力する必要があります。理想的にはこのデータは、試験または材料サプライヤーから得ます。
- $M-Flag=1-7$ 、定義済みの材料データ
破壊ひずみデータが入手できない場合、7つの定義済み材料から選ぶことができます。図 197は、7つの材料について、破壊曲線における塑性ひずみを示しています。

 注: 定義済みの値は各設計調査に提供され、それらの材料が同じ特性を有するかを検証するのはユーザーの責任です。

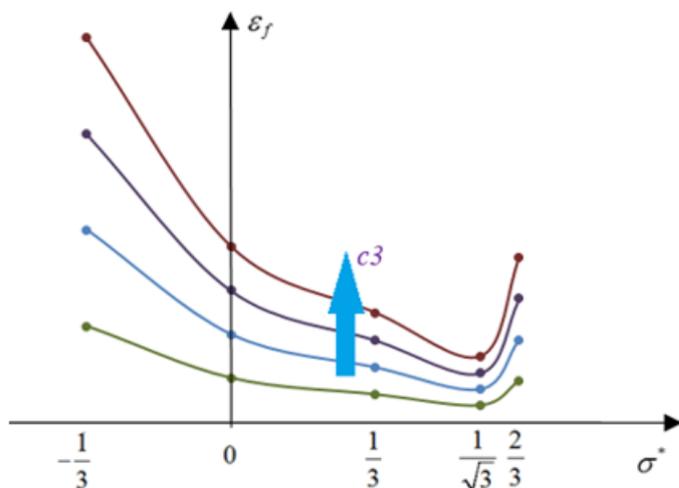


図 198: 塑性破壊ひずみ曲線の変更
同じ破壊塑性ひずみ速度で、単軸引張破壊c3を大きくすることで

デフォルトの挙動

デフォルトでは、c1からc5には、0以外の値を入力する必要があります。しかしながら、破壊情報が欠落している場合、独特なデフォルト値が存在します。

- 材料破壊の挙動が未知である場合、c1からc5までは0.0に設定され、軟鋼挙動 ($M-Flag=1$) が使用されます。
- 引張破壊値のみが既知である場合、c3が定義されます ($c1 = c2 = c4 = c5 = 0.0$)。軽度な鋼鉄挙動が使用され、ユーザー定義のc3値によってスケールリングされます。
- 材料挙動が既知である場合、 $M-Flag$ が定義され、c3は期待される引張破壊に従った破壊モデルの調整に使用できます。選択された材料挙動は、ユーザー定義のc3値によってスケールリングされます。
- それ以外の場合、c1～c5は定義される傾向にあり、デフォルト値0.0が使用されます。

要素破壊処理

損傷累積法は、要素内の各積分点において発生した塑性ひずみの量を以下を用いて合計するために使用されます：

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_f} \geq 1 \quad (154)$$

ここで、

D	損傷
$\Delta \epsilon_p$	積分点の塑性ひずみの変化
ϵ_f	現在の応力軸性における塑性破壊ひずみ

シェル要素については、積分点が $D = 1$ に達すると、積分点応力テンソルがゼロにセットされます。厚み全体の破断した積分点の比率が $P_thickfail$ に等しくなると、要素が破断し、削除されます。ソリッド要素では、積分点が $D = 1$ に達すると、要素は削除されます。

平面ひずみは大域的最小

S-Flag=2オプションは、塑性ひずみ曲線の大域的最小が平面ひずみ応力軸性位置c4で起こるようにするために使用できます。これは、2つ目の式を2つの別々の2次サブ関数に分割することで達成されます。

材料の不安定性のモデル化(肉やせ)

シートメタルのような材料では、材料の厚みの減少や拡散ネックングが引張载荷中に現れることがあります。これは肉やせと呼ばれ、通常 $\frac{1}{3} \leq \sigma^* \leq \frac{2}{3}$ の応力軸性範囲で起こります。



図 199:

/FAIL/BIQUADでは、この肉やせをオプションS-Flag=3およびInst_startを使ってシミュレートすることが可能です。このオプションは、S-Flag=2と同じ塑性破壊ひずみオプションを使用し、応力軸性 $\frac{1}{3}$ および $\frac{2}{3}$ の間の肉やせの開始を表す曲線を定義する2つの追加の2次関数を追加します。この曲線の最小値は、Inst_startフィールド内でユーザーによって定義され、平面ひずみ引張 $\sigma^* = \frac{1}{\sqrt{3}}$ で生じます。この肉やせ曲線を用いて、2番目の肉やせ損傷値が計算され、肉やせによる破断はすべての積分点が $D = 1$ に達した際にのみ起こります。肉やせ基準は、Marciniak-Kuczynski解析に基づきます。¹³

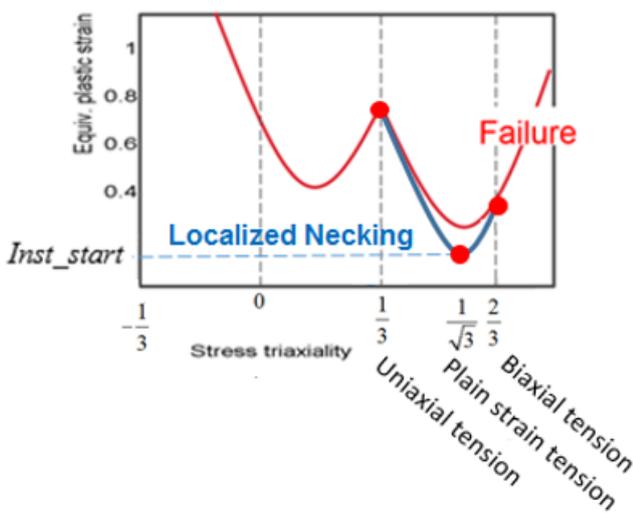


図 200: デフォルトの破壊ひずみ曲線
 追加の肉やせ曲線(青色)

S-Flag=1または2の使用時、損傷累積は、塑性曲線(図 201で赤色)で塑性ひずみに達した際に始まります。

S-Flag=3が肉やせの描写に使用される場合、損傷累積は、肉やせ曲線(図 201で青色)で塑性ひずみに達した際に始まります。肉やせについて、すべての積分点が損傷に至ると(D = 1)要素は削除されます。肉やせのせいではない要素の削除はP_thickfailで定義されます。

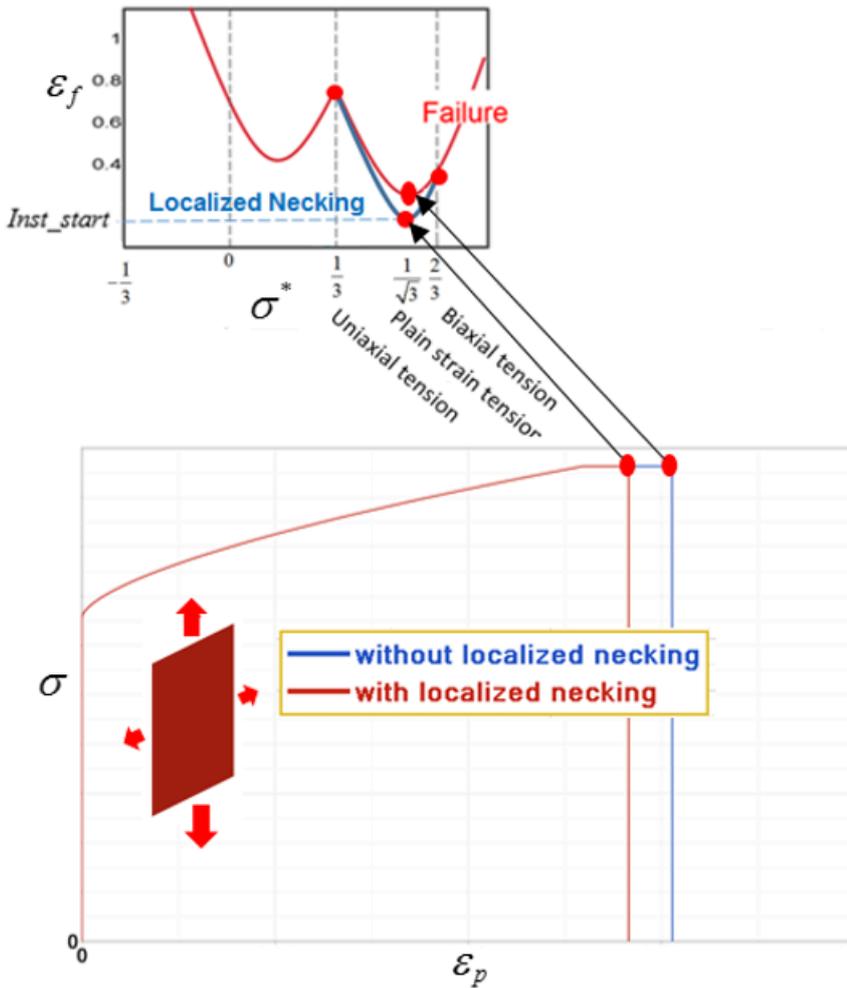


図 201:

破壊限界の摂動

材料の不完全性または製造プロセスのせいで、材料の破壊ひずみは場所によっては全く同じではない場合があります。したがって、破壊限界の非常に小さい摂動は存在し得ます。M-Flag>0を/PERTURB/FAIL/BIQUADと使用する際は、破壊限界の統計的分布が、破壊モデルに割り当てられている各要素に適用されます。これは、/FAIL/BIQUAD、c3に適用されている破壊のスケールファクターのランダム分布または正規分布を計算することによって行われます。2つの異なる分布の手法が図 202と図 203に示されています。

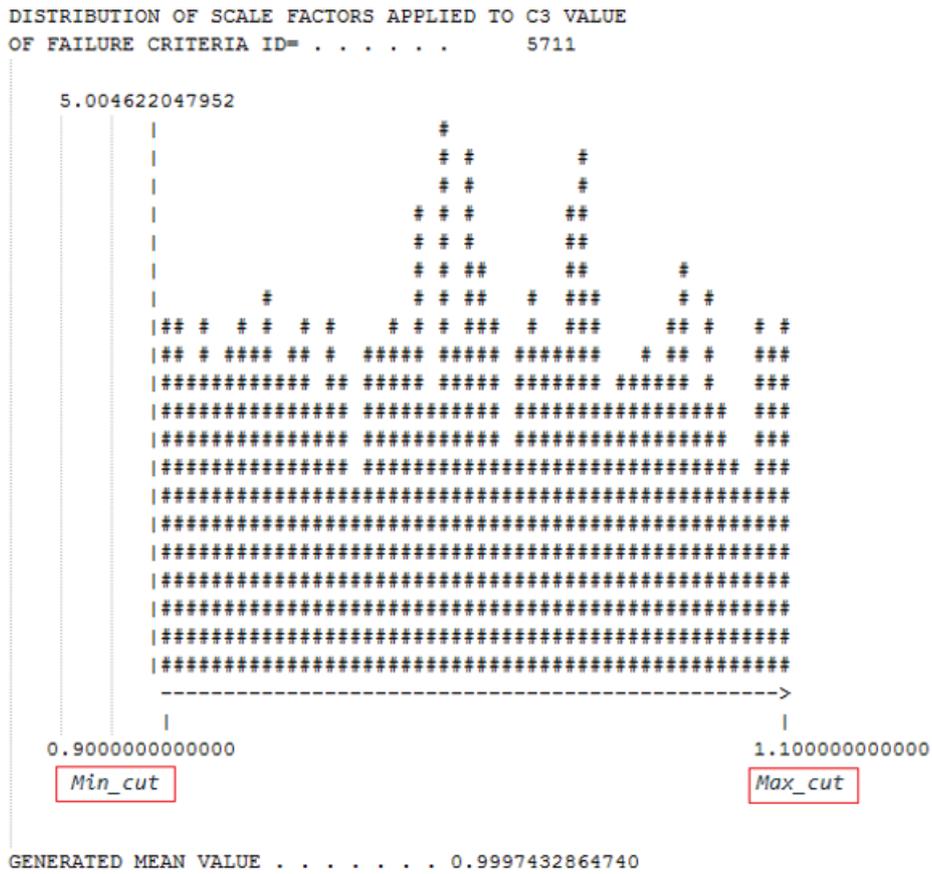


図 202: ランダム分布
Idistri=1、Starter *0.outファイル内の破壊限界

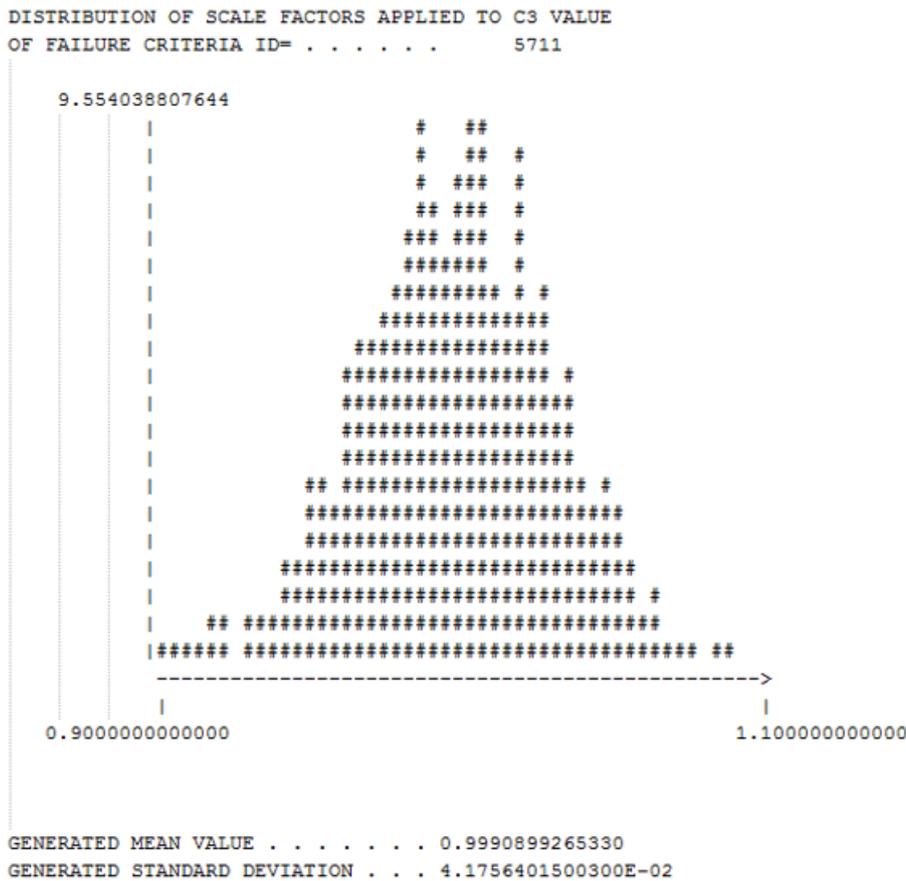


図 203: 正規(ガウス)分布
*Idistri=2, Starter *0.out*ファイル内の破壊限界

/FAIL/BQUADは、右記の値に依存するユーザー定義の速度 $r1$ 、 $r2$ 、 $r4$ および $r5$ または事前定義された材料のひずみ速度値を用いて破壊曲線全体をスケーリングするために/PERTURB/FAIL/BIQUADによって生成される $c3$ の非常に小さな摂動を使用します; *M-Flag. c3*

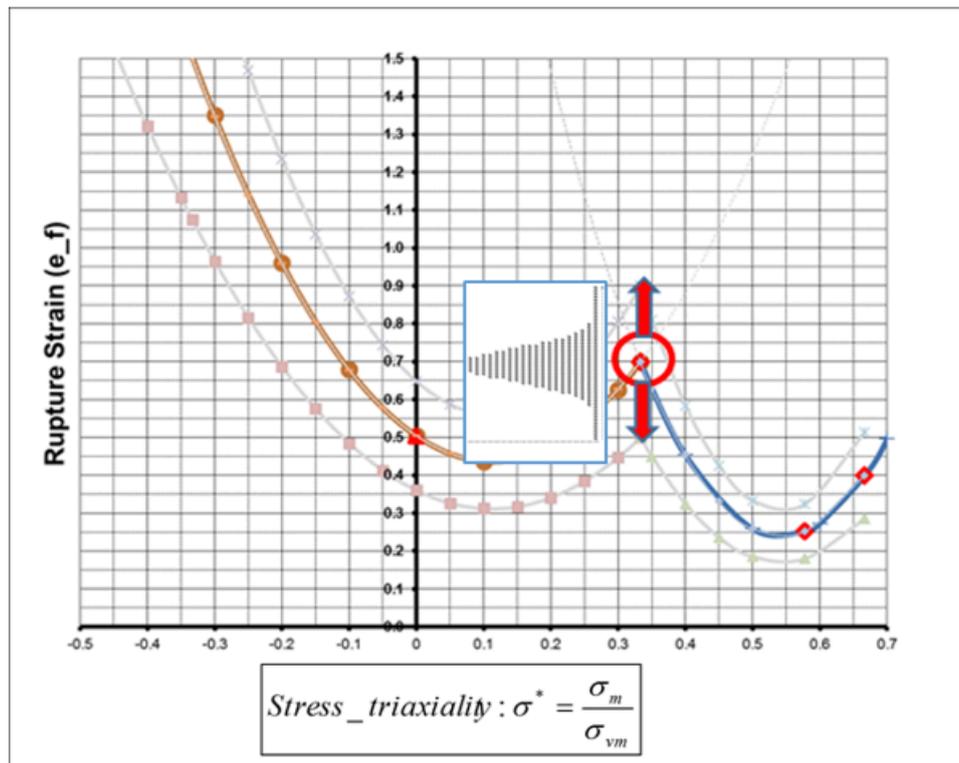


図 204:

参考文献

表形式破壊モデル /FAIL/TAB1

Radiossでは、/FAIL/TAB1が延性材料用で最も洗練された破壊モデルです。破壊ひずみは、応力軸性、ひずみ速度、Lode角、要素サイズ、温度および不安定性ひずみの関数として定義できます。

損傷は、ユーザー定義の関数に基づいて累積されます。この破壊モデルの機能は、最も基本的な入力から始まり、最も複雑なオプション群まで説明されます。

塑性破壊ひずみ

/FAIL/JOHNSONや/FAIL/BIQUADと同様に、塑性破壊ひずみ ϵ_f を応力軸性 σ^* の関数として表現する曲線を定義することが可能です。破壊ひずみ曲線が事前定義された方程式内のパラメータを使って定義される/FAIL/JOHNSONや/FAIL/BIQUADとは異なり、/FAIL/TAB1では任意の数の離散点を入力して、破壊ひずみ曲線を表す任意の関数を生成することができます。この曲線は、/TABLEエンティティを用いて定義され、table_ID₁で参照されます。この手法は、シェル要素とソリッド要素に使用できます。

- Pack, Keunhwan, and Dirk Mohr. "Combined necking & fracture model to predict ductile failure with shell finite elements." *Engineering Fracture Mechanics* 182 (2017): 32-51

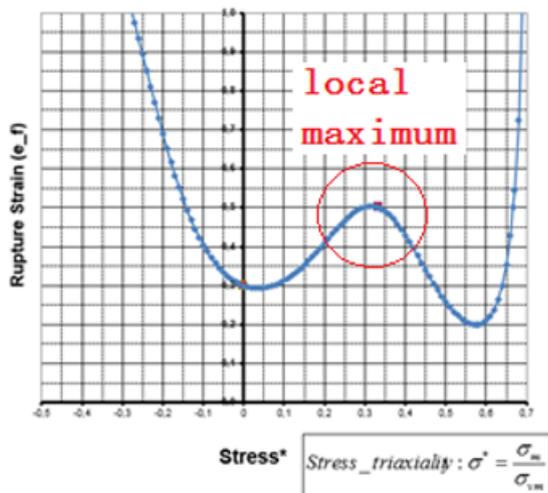


図 205: 離散点を局所最大値と用いて定義された材料破壊曲線

例 /TABLE,dimension=1

破壊塑性-ひずみの入力vstable_ID₁を用いた軸性

```

/TABLE/1/4711
failure plastic-strain vs triaxiality
#dimension
1
#      Triaxiality      Failure_Strain
-0.7000      0.3386
-0.6000      0.3068
-0.5000      0.2794
-0.4000      0.2558
-0.3333      0.2419
-0.3000      0.2355
-0.2000      0.2180
-0.1000      0.2029
0.0000      0.1900
0.1000      0.1789
0.2000      0.1693
0.3000      0.1610
0.3333      0.1585
0.4000      0.1539
0.5000      0.1478
0.6000      0.1425
0.7000      0.1380
    
```

ひずみ速度依存

/FAIL/TAB1は、材料破壊にひずみ速度の影響を含めることも可能です。この場合、1つ目の次元は破壊曲線の関数ID、2つ目の次元は破壊曲線が適用されるひずみ速度であるよう/TABLEを定義する必要があります。

例 /TABLE,dimension=2

```

/TABLE/1/4711
failure plastic-strain vs triaxiality and strain rate
#dimension
2
#      FCT_ID      strain_rate
3000      1E-4
3001      0.1
3002      1.0
/FUNCT/3000
failure plastic-strain vs triaxiality
#      Triaxiality      Failure_Strain
-0.7000      0.3386
-0.6000      0.3068
-0.5000      0.2794
-0.4000      0.2558
-0.3333      0.2419
    
```

-0.3000	0.2355
-0.2000	0.2180
-0.1000	0.2029
0.0000	0.1900
0.1000	0.1789
0.2000	0.1693
0.3000	0.1610
0.3333	0.1585
0.4000	0.1539
0.5000	0.1478
0.6000	0.1425
0.7000	0.1380

```

/FUNCT/3001
failure plastic-strain vs triaxiality
#      Triaxiality      Failure Strain
      -0.7              0.27088
      -0.6              0.24544
      -0.5              0.22352
      -0.4              0.20464
     -0.3333           0.19352
      -0.3              0.1884
      -0.2              0.1744
      -0.1              0.16232
       0                0.152
       0.1              0.14312
       0.2              0.13544
       0.3              0.1288
     0.3333           0.1268
       0.4              0.12312
       0.5              0.11824
       0.6              0.114
       0.7              0.1104

```

ソリッド要素のLode角

ソリッド要素の場合、破壊ひずみもまた、Lode角を用いて定義された3次元応力ひずみに依存します。

これは、破壊ひずみをLode角パラメータの関数として

Radiossでは、Lode角は、正規化され無次元のLode角パラメータ ζ を使って入力され、ここで定義されます。

あるポイントPにおける応力状態は、主応力 $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ で表されますが、応力不変量 (I_1, J_2, J_3) を使って表すこともできます。応力不変量を用いる利点は、応力不変量が一定で座標系の向きに依存しない点にあります。図 206では、ポイントP $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ の応力状態を応力不変量を使って正しく表すために、その大きさを次のように表します: \mathbf{OO}'

$$\sqrt{3}\sigma_m = \frac{\sqrt{3}}{3}I_1 \quad (155)$$

ここで、

σ_m	平均応力
I_1	第1応力不変量 $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$

\mathbf{OO}' は静水圧軸内にあり、これは、この軸内の主応力が同じ $(\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3)$ であることを意味しています。 $|\mathbf{OO}'|$ は静水圧です。

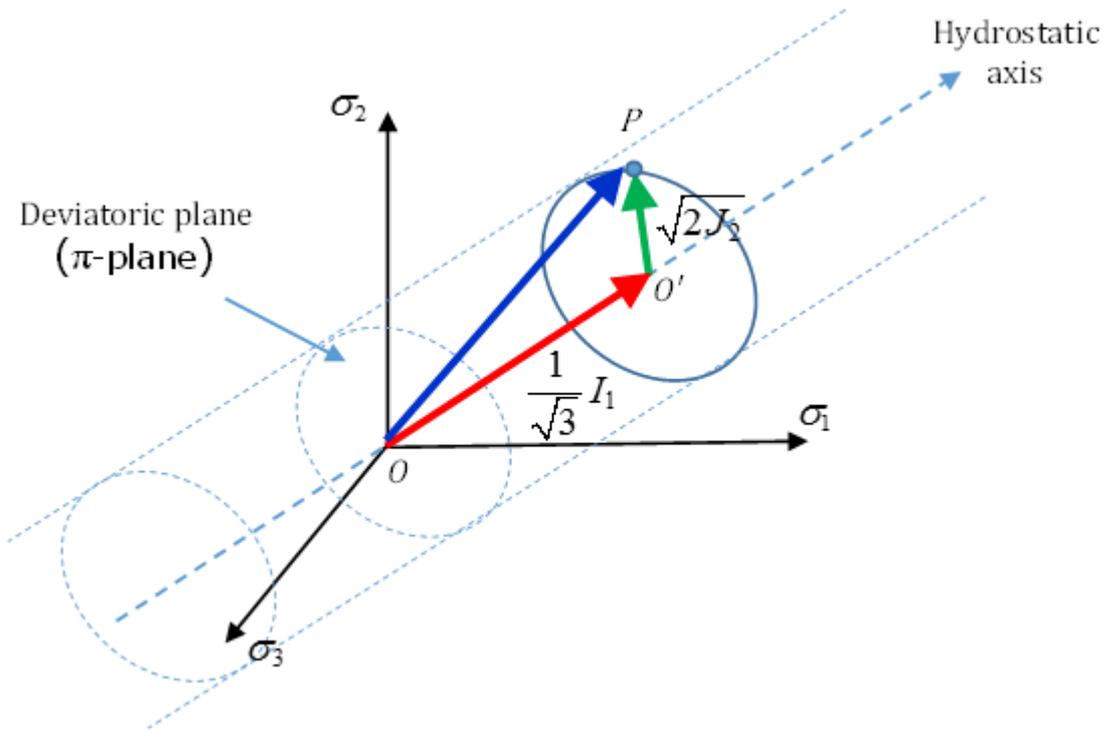


図 206: Pの応力状態

O'Pの大きさは:

$$\sqrt{2J_2} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_{VM} \quad (156)$$

ここで、 J_2 偏差応力 $\mathbf{s}(\mathbf{s} = \boldsymbol{\sigma} - \mathbf{p})$ の第2不変量で、 $J_2 = \frac{1}{2}(S_1^2 + S_2^2 + S_3^2) = \frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$ 。

ポイントPを特定するには、円形版内の角度が計算される必要があります。この角度が、Lode角 θ と呼ばれます:

$$\cos(3\theta) = \frac{27}{2} \frac{J_3}{\sigma_{VM}^3} = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \quad (157)$$

ここで、 $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}$ で、 J_3 は次のように計算される偏差応力の第3不変量:

$$J_3 = S_1 S_2 S_3 \quad (158)$$

/FAIL/TAB1では、正規化され無次元であるLode角パラメータ ζ (範囲は $-1 \leq \zeta \leq 1$)が使用され、次のように定義されます:

$$\zeta = \cos(3\theta) \quad (159)$$

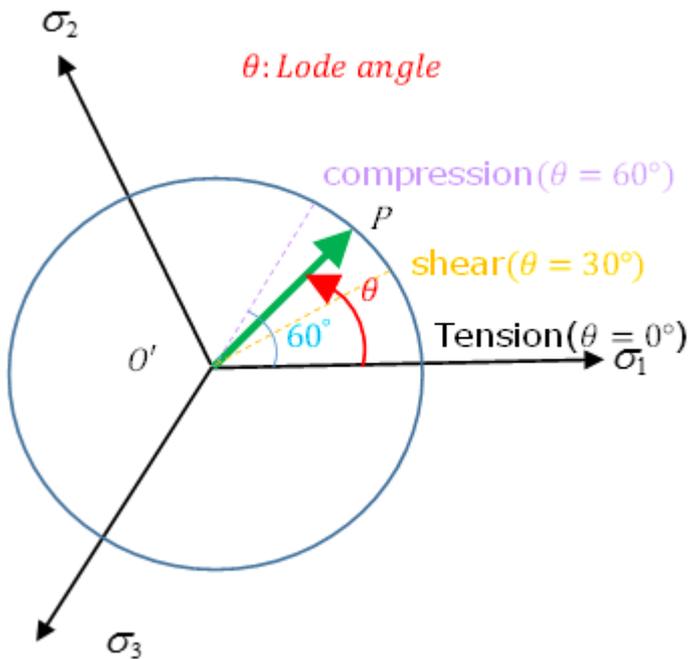


図 207: 異なるLode角と応力状態

Lode角 θ およびLode角パラメータ ζ の特殊な特性を以下に示します:

Lode角パラメータ ζ	Lode角 θ	応力状態
1	0	単軸引張 + 静水圧 (3軸引張または軸対称引張)
0	30	純せん断 + 静水圧 (平面ひずみ)
-1	60	単軸圧縮 + 静水圧 (軸対称圧縮)

破壊ひずみサーフェスは、応力軸性およびLode角破壊データから生成できます。

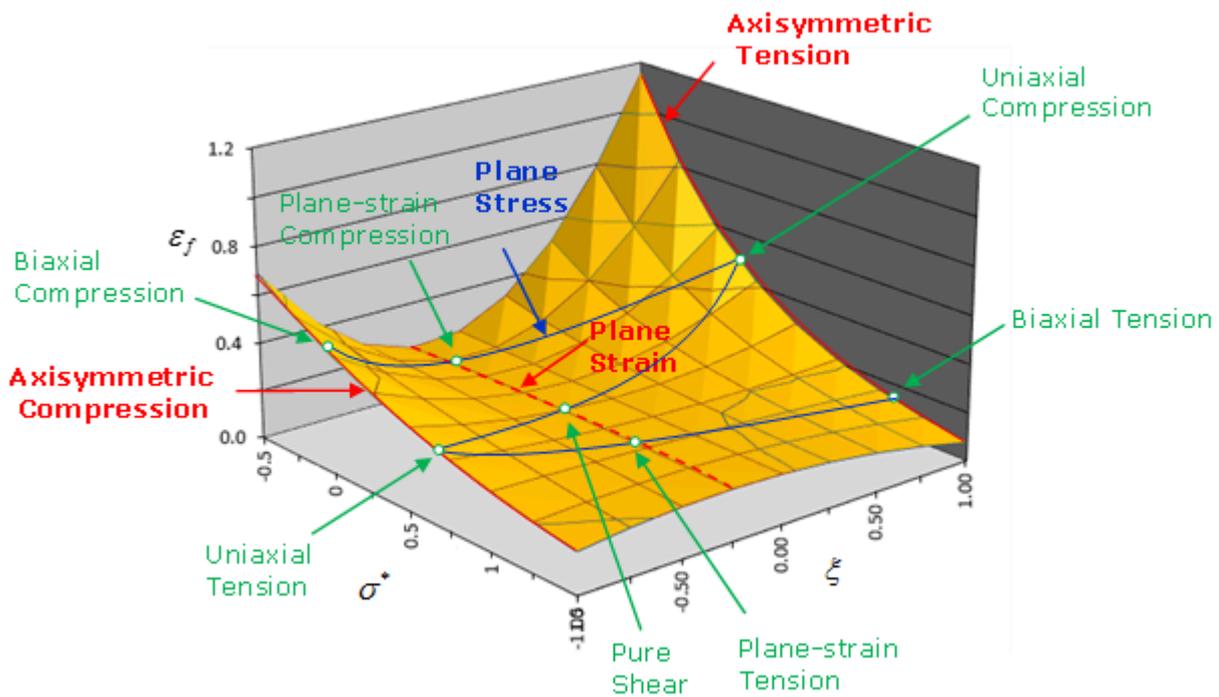


図 208: 3次元破壊サーフェス

材料破壊サーフェスは、次の材料試験を用いて生成することができます。

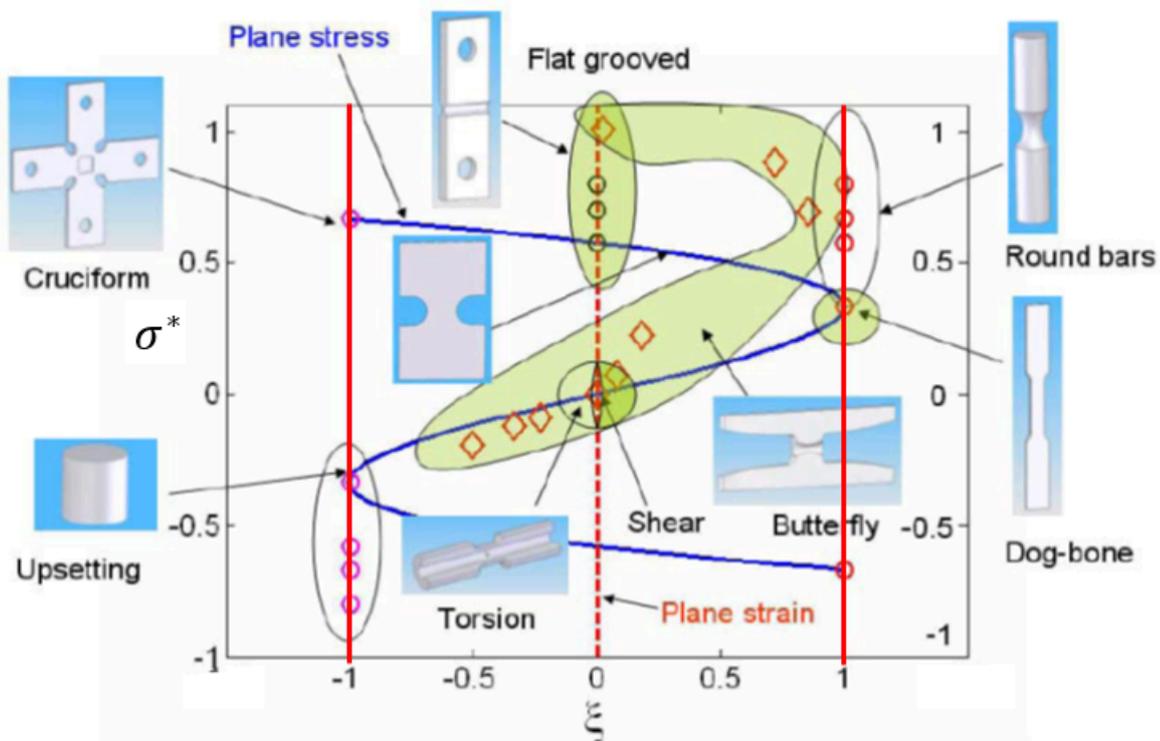


図 209: 各種試験の応力状態とLode角

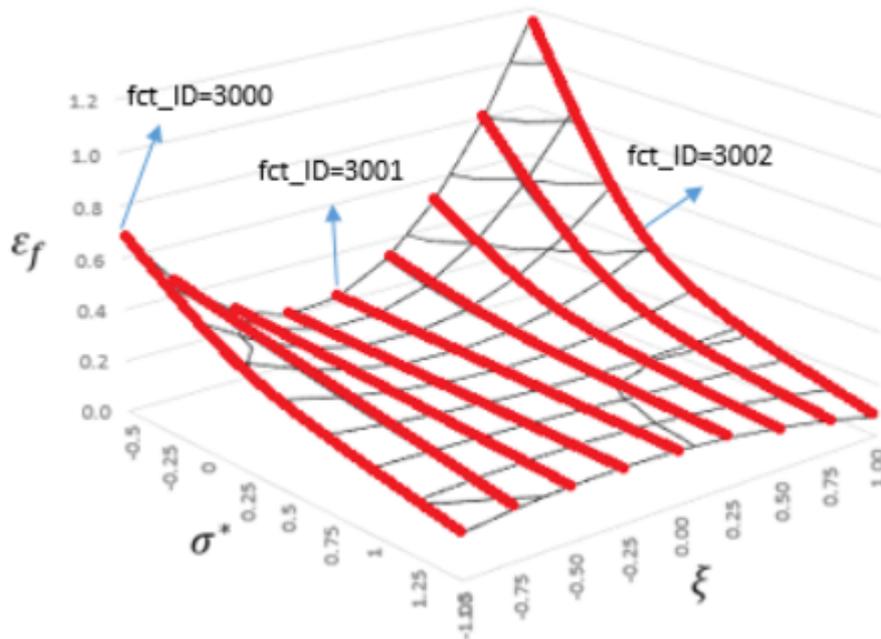
例 /TABLE,dimension=3

破壊塑性-ひずみの入力 vs $table_ID_1$ を用いた軸性、ひずみ速度、Lode角

```

/TABLE/1/4711
failure plastic-strain vs triaxiality and strain rate
#dimension
3
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
# FCT_ID strain_rate Lode_angle
3000 1E-4 -1
3001 0.1 0
3002 1.0 1
....

```

図 210: $table_ID_1$ が/TABLEを参照し、 $dimension=3$ の場合、破壊サーフェス

破壊ひずみのスケールリング

温度と要素寸法に基づく材料破壊は、以下を用いて要素寸法および / または温度に応じて破壊ひずみをスケールリングする関数を含めることによって、/FAIL/TAB1で考慮されます：

$$\varepsilon_f = X_{scale1} \cdot f(\sigma^*, \dot{\varepsilon}, \xi) \cdot factor_{el} \cdot factor_T \quad (160)$$

ここで、

X_{scale1}	一般的なスケールファクター
$factor_{el}$	要素サイズに基づいたスケールファクター
$factor_T$	温度に基づいたスケールファクター

要素長の依存性

数値シミュレーションでは、要素寸法は材料破壊に影響を及ぼします。同じ破壊パラメータを使用すると、粗いメッシュは細かいメッシュよりも早く破壊します。

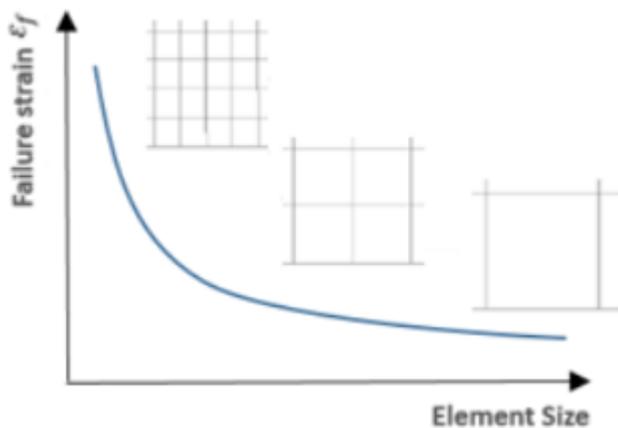


図 211: 数値シミュレーションにおける要素メッシュ寸法の材料破壊への影響

メッシュ寸法に基づく結果のバリエーションを考慮し、要素寸法のスケールファクターは、メッシュ要素寸法に基づいて破壊ひずみをスケールリングするために定義され得ます。式 160で定義されるスケールファクターは:

$$factor_{el} = Fscale_{el} \cdot f_{el} \left(\frac{Size_{el}}{El_ref} \right) \quad (161)$$

ここで、

$Fscale_{el}$

要素サイズ関数スケールファクター

$f_{el} \left(\frac{Size_{el}}{El_ref} \right)$

正規化された要素寸法 (fct_ID_{el} で定義) の関数としての破壊ひずみスケールファクターで、 El_ref は要素寸法の正規化に用いられる参照要素寸法

たとえば、材料検証シミュレーションでは、2mmのメッシュ寸法が使用されました。初期検証の後、同じシミュレーションが異なる要素寸法と $El_ref = 2$ を用いて再実行され、各要素寸法について正しいスケールファクターが決定されます。2番目の検証の結果を用いて、破壊ひずみスケールファクター関数が(図 212)のように構築されます:

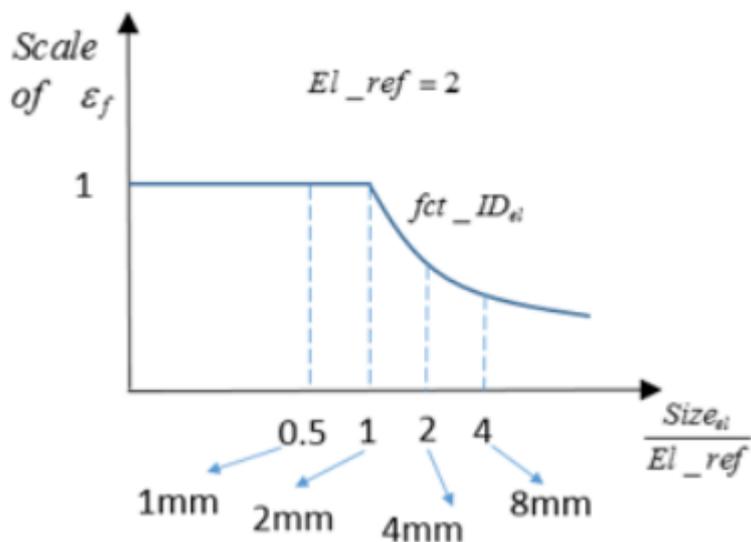


図 212: /FAIL/TAB1での要素寸法スケールファクター関数 fct_ID_{el} の例

温度の依存性

温度が材料破壊に対しどのように影響するか考慮するために、式 160で定義された破壊ひずみ値を、温度スケールファクター関数を用いてスケールリングすることが可能です：

$$factor_T = Fscale_T \cdot f_T(T_{start}) \tag{162}$$

ここで、

$Fscale_T$ 温度関数スケールファクター

$f_T(T_{start})$ fct_ID_T を介して定義された温度の関数としての破壊ひずみスケールファクター

温度に基づく破壊ひずみのスケールリングは、/HEAT/MATが定義されている材料、または/MAT/LAW2 (PLAS_JOHNS) のように熱塑性が含まれる材料に機能します。

fct_ID_T では、温度は溶融温度または初期温度に対して定義されます。

$$T^* = \frac{T - T_{ini}}{T_{melt} - T_{ini}} \tag{163}$$

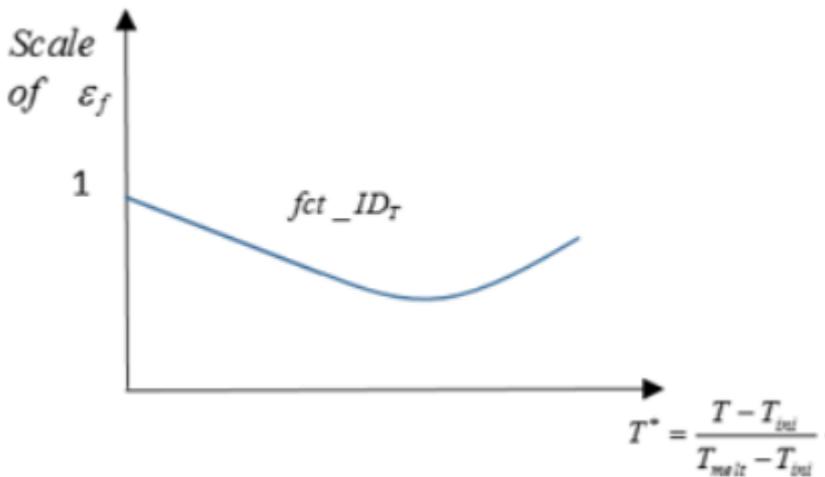


図 213: /FAIL/TAB1での fct_ID_T による材料破壊への温度の影響

要素破壊処理

/FAIL/TAB1では、累積損傷モデルが使用されます。損傷は、Engineオプション/ANIM/SHELL/DAMAまたは/ANIM/BRICK/DAMAを使用して、コンタープロット用に出力することができます。

累積損傷はまず、損傷の増分を計算することによって計算されます：

$$\Delta D = \frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_f} \cdot n \cdot D_p(1 - \frac{1}{n}) \tag{164}$$

ここで、

$\Delta \epsilon_p$ 積分点の塑性ひずみの変化

ϵ_f 現在の応力軸性における塑性破壊ひずみ

D_p および n 損傷のパラメータ

損傷累積は:

$$D = \frac{\sum \Delta D}{D_{crit}} \tag{165}$$

ここで、 D_{crit} は /FAIL/TAB1で定義され、推奨される値は0と1の間です。要素は、 $D \geq 1$ 、すなわち $\sum \Delta D \geq D_{crit}$ である際に破断します。

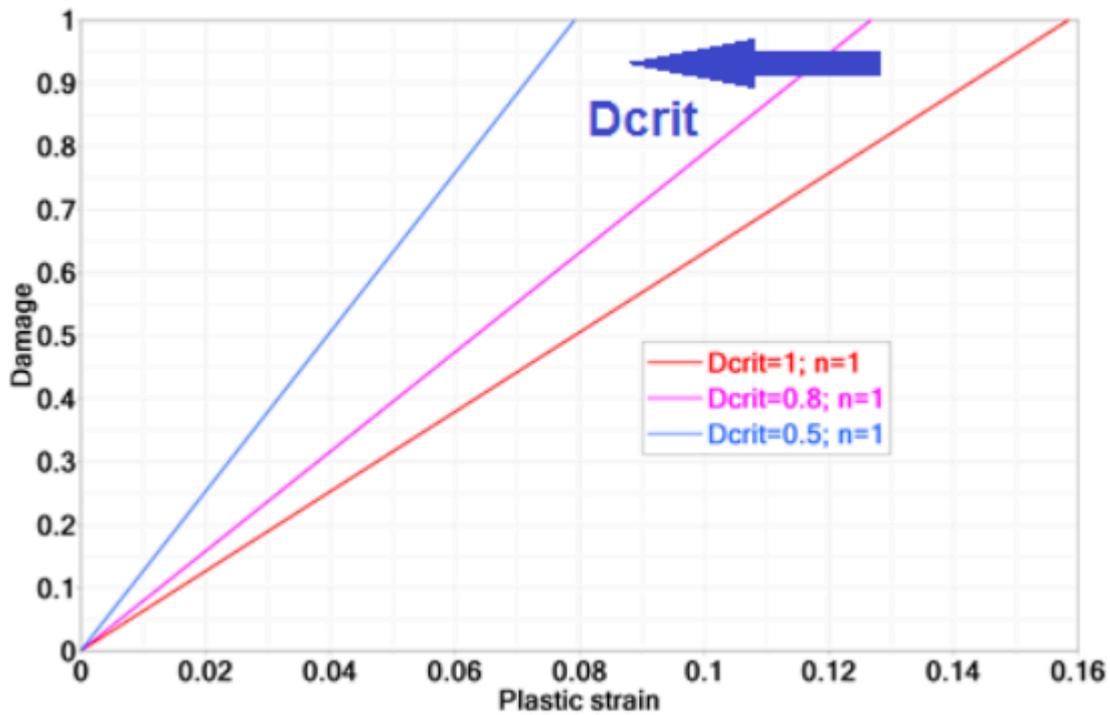


図 214: /FAIL/TAB1での D_{crit} の影響

式 164で損傷累積パラメータ n の影響を理解することも興味深いことです。
 $n=1$ の場合損傷は線形、そうでない場合は損傷曲線は非線形となります。

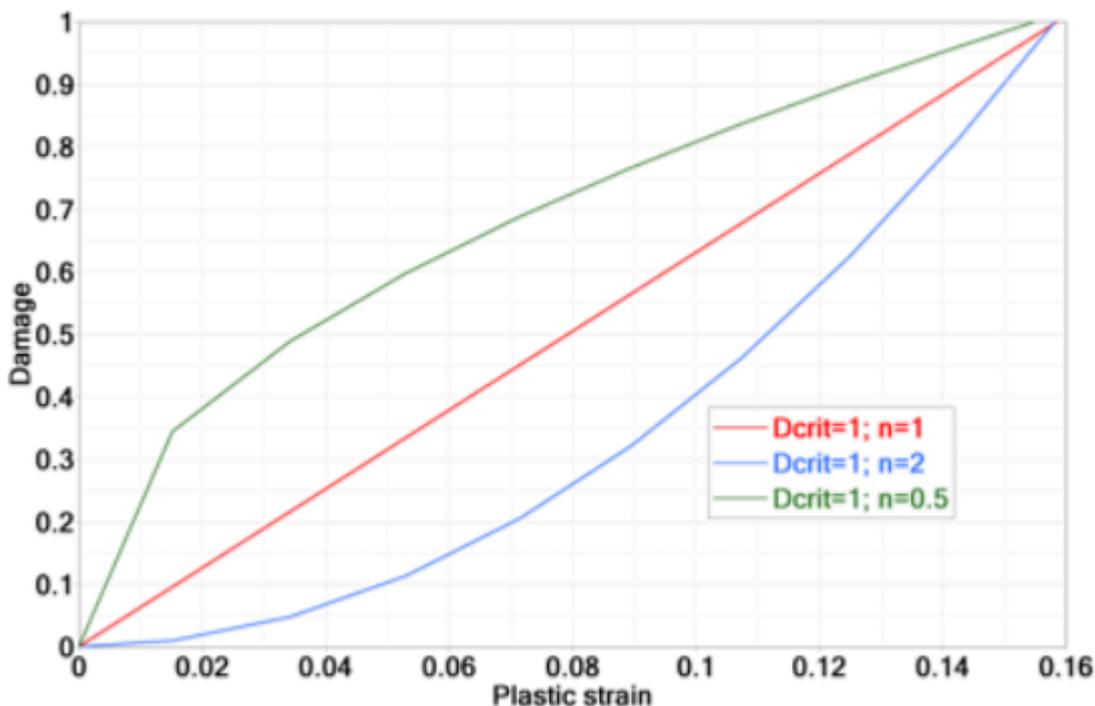


図 215: 損傷の影響パラメータ n

材料の不安定性(拡散ネッキング)

引張試験では、材料は最大工学応力に達し、次に、応力は減少します(軟化と呼ばれることもある)。この最大工学応力ポイントは、ネッキングポイントと称されます。ネッキング後、真の応力は、切断面領域内の減少のため、実際には増加します。これは拡散ネッキングと呼ばれます。シートメタルでは、材料が引張方向に継続的に载荷されると、拡散領域内での厚みの減少や局所的なネッキング(肉やせ)が起こる可能性があります。拡散ネッキングは通常 $0 < \sigma^* \leq \frac{2}{3}$ の範囲で、肉やせは $\frac{1}{3} \leq \sigma^* \leq \frac{2}{3}$ の範囲で起こります。

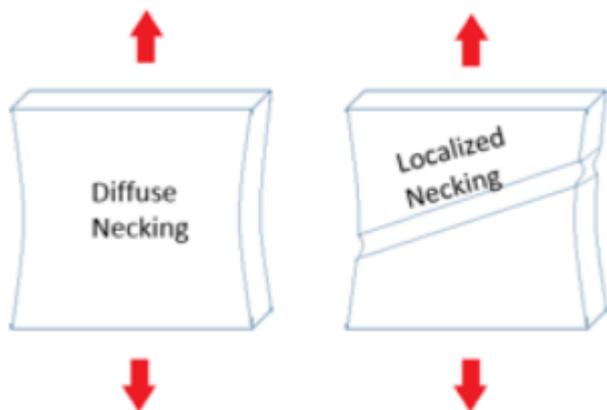


図 216: 拡散ネッキングと肉やせのスケッチ

/FAIL/TAB1では、オプションtable_ID₂またはInst_startとFad_explによって材料の不安定性(拡散ネッキング)を考慮に入れることが可能です。

材料は、不安定性ひずみに達すると、拡散ネッキングのせいで弱化し始めます。材料内の減少した応力は：

$$\sigma_{reduced} = \sigma \cdot \left(1 - \left(\frac{D_{instability} - inst_start}{1 - inst_start} \right)^{Fad_exp} \right) \quad (166)$$

ここで、

$$D_{instability} = \sum \frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_f} \quad (167)$$

ϵ_f は、その時点での応力の軸性に基づいた拡散ネッキングひずみです。

不安定性が始まるひずみは、*table_ID2*を用いた曲線(図 217内の青い曲線)での入力、またはオプション*Inst_start*を用いた制約ひずみとしての入力のいずれかです。

単軸引張試験では、 $\sigma^* = \frac{1}{3}$ です。

- 材料の不安定性が含まれない場合、損傷は赤色の破壊曲線を使って計算されます； 図 217
- 材料の不安定性が含まれ、曲線入力を用いてモデル化されている(*table_ID2*)場合：
 - 拡散ネッキングによる損傷は、図 217で青色の曲線で定義される塑性ひずみに達すると始まります。
 - 拡散ネッキングによる損傷は、*Fad_exp*=1が使用される場合は線形となります。*Fad_exp*が大きくなると、損傷中に、より多くのエネルギーが消散されます。図 217 は、応力-ひずみ曲線の1から10までの*Fad_exp*の影響を示しています。*Fad_exp*は、5から10までの値を使用することが推奨されます。
 - ひずみが赤色の曲線に達すると、要素は破断します。

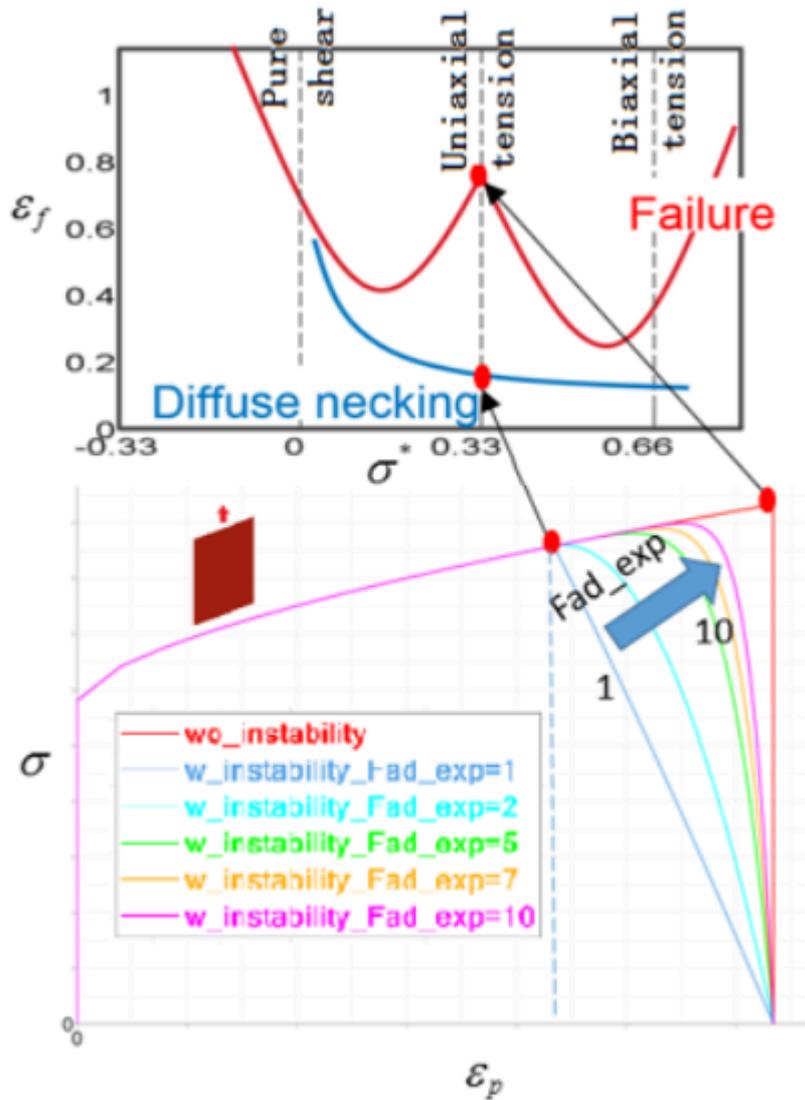


図 217: パラメータFad_expの影響と材料不安定性領域

- *Inst_start*のみが曲線入力なしで

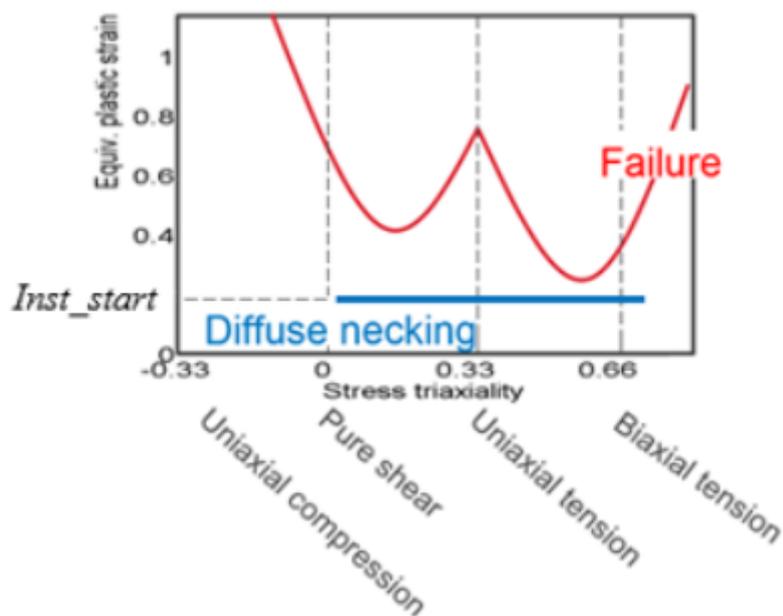


図 218: 拡散ネッキングを描写する一定 $Inst_start$

現時点では、/FAIL/TAB1での拡散ネッキング(材料の不安定性)は、28より大きい数の材料則とのみ使用できます。

14. Wierzbicki, Tomasz, "Addendum to the Research Proposal on Fracture of Advanced High Strength Steels", page 19, January 2007.
15. Wierzbicki, Tomasz. "Fracture of AHSS Sheets-Addendum to the Research Proposal on Fracture of Advanced High Strength Steels." Impact and Crashworthiness Laboratory, Massachusetts Institute of Technology (2007).

複合材

複合材料は、相互に結合された2つ以上の材料から成ります。大部分の複合材は、2つの材料、バインダー(マトリックス)、および補強で構成されます。補強には、微粒子、不連続繊維、および連続繊維という3つの形式があります。

複合材の材料

Radiossでは、複合材材料を表すために、以下の材料則が使用されます：

- LAW12とLAW14
- LAW15(LAW25+/FAIL/CHANGの使用を推奨)
- LAW25
- LAW19(Fabric用、/PROP/TYPE9でのみ使用)
- LAW58(Fabric用、/PROP/TYPE16でのみ使用)

表 19: 複合材材料、プロパティ、破壊モデルおよび要素タイプの互換性

	シェル要素	ソリッド要素	破壊モデル
LAW12		/PROP/TYPE6 (SOL_ORTH) /PROP/TYPE21 (TSH_ORTH) /PROP/TYPE22 (TSH_COMP)	/FAIL/HASHIN /FAIL/PUCK /FAIL/LAD_DAMA
LAW14		/PROP/TYPE6 (SOL_ORTH) /PROP/TYPE21 (TSH_ORTH) /PROP/TYPE22 (TSH_COMP)	/FAIL/HASHIN /FAIL/PUCK /FAIL/LAD_DAMA
LAW15	/PROP/TYPE9 (SH_ORTH) /PROP/TYPE10 (SH_ORTH) /PROP/TYPE11 (SH_SANDW) /PROP/TYPE17 (STACK) /PROP/TYPE19 (PLY)		/FAIL/CHANG
LAW25	/PROP/TYPE10 (SH_ORTH)	/PROP/TYPE6 (SOL_ORTH) /PROP/TYPE14 (SOLID)	/FAIL/CHANG /FAIL/HASHIN

	シェル要素	ソリッド要素	破壊モデル
	/PROP/TYPE11 (SH_SANDW) /PROP/TYPE17 (STACK) /PROP/TYPE19 (PLY) /PROP/TYPE51 /PROP/PCOMPP	/PROP/TYPE20 (TSHELL) /PROP/TYPE21 (TSH_ORTH) /PROP/TYPE22 TSH_COMP)	/FAIL/PUCK /FAIL/LAD_DAMA(ソリッド 要素のみ)
LAW19	/PROP/TYPE9 (SH_ORTH)		
LAW58	/PROP/TYPE16 (SH_FABR)		

LAW12とLAW14

Tsai-Wu定式化を使用する直交異方性ソリッド材料を記述します。この材料は、Tsai-Wu基準を満たすまでは、3次元直交異方性弾性です。LAW12はLAW14を一般化および改善したものです。

弾性相

どちらの材料則も、弾性相で材料の直交異方性を記述するには、ヤング率、せん断係数、およびポアソン比(9パラメータ)が必要です。

E_{11}	E_{22}	E_{33}
ν_{12}	ν_{23}	ν_{31}
G_{12}	G_{23}	G_{31}

図 219:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & -\frac{\nu_{31}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{E_{22}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{22}} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{2G_{12}} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1}{2G_{23}} & 0 \\ & \text{symm.} & & & & \frac{1}{2G_{31}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{bmatrix} \quad (168)$$

応力損傷

σ_{t1}	σ_{t2}	σ_{t3}	δ
---------------	---------------	---------------	----------

図 220:

損傷では、応力制限 σ_{t1} 、 σ_{t2} and σ_{t3} (引張り / 圧縮)が要求されます。これらの応力制限は、関連する3つの方向での引張り試験で確認することができます。

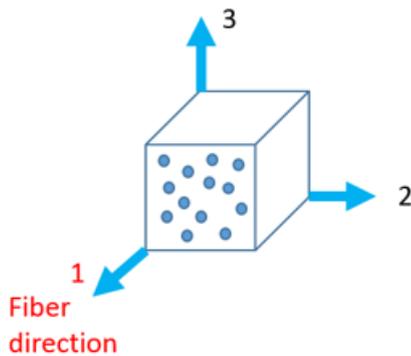


図 221:

応力制限に達すると、材料の損傷が始まります(応力は損傷パラメータ δ により減少)。損傷($D_i = D_i + \delta$)が $D=1$ に達すると、応力は0になります。

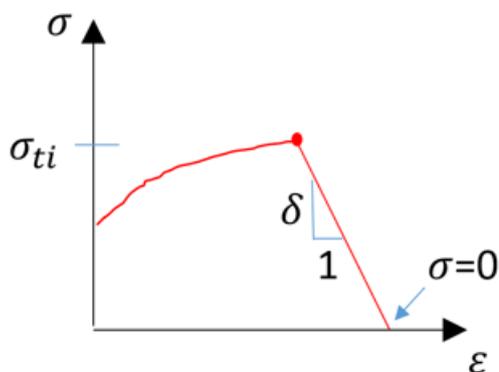


図 222:

Tsai-Wu降伏基準

LAW12(3D_COMP)の場合、Tsai-Wu降伏基準は次のようになります:

$$F(\sigma) = F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_3\sigma_3 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{33}\sigma_3^2 + F_{44}\sigma_{12}^2 + F_{55}\sigma_{23}^2 + F_{66}\sigma_{31}^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + 2F_{23}\sigma_2\sigma_3 + 2F_{13}\sigma_1\sigma_3 \quad (169)$$

Tsai-Wu基準の12の係数は、以下の試験による降伏応力を使用して決まります:

引張り / 圧縮試験

- 縦方向引張り / 圧縮(方向1):

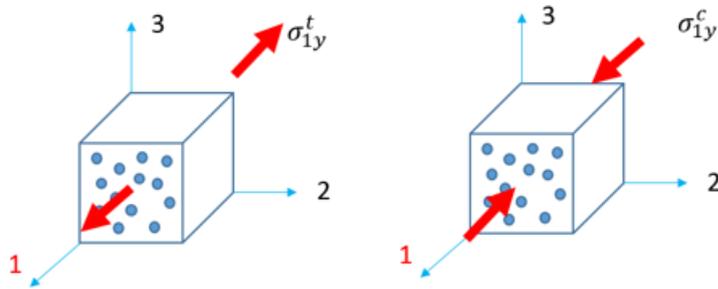


図 223:

$$F_1 = -\frac{1}{\sigma_{1y}^c} + \frac{1}{\sigma_{1y}^t} \quad (170)$$

$$F_{11} = \frac{1}{\sigma_{1y}^c \sigma_{1y}^t} \quad (171)$$

- 横方向引張り / 圧縮(方向2):

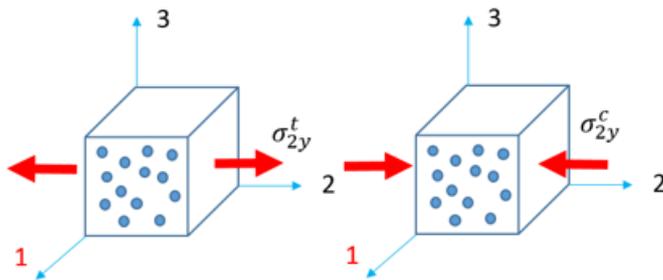


図 224:

$$F_2 = -\frac{1}{\sigma_{2y}^c} + \frac{1}{\sigma_{2y}^t} \quad (172)$$

$$F_{22} = \frac{1}{\sigma_{2y}^c \sigma_{2y}^t} \quad (173)$$

- 横方向引張り / 圧縮(方向3):

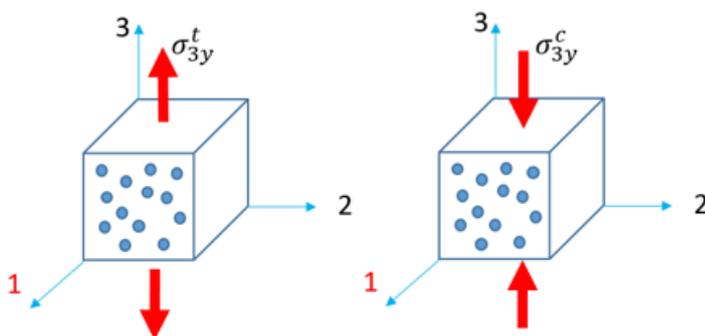


図 225:

$$F_3 = -\frac{1}{\sigma_{3y}^c} + \frac{1}{\sigma_{3y}^t} \quad (174)$$

$$F_{33} = \frac{1}{\sigma_{3y}^c \sigma_{3y}^t} \quad (175)$$

これで、相互作用係数が次のように計算できます：

$$F_{12} = -\frac{1}{2} \sqrt{(F_{11} F_{22})} \quad (176)$$

$$F_{23} = -\frac{1}{2} \sqrt{(F_{22} F_{33})} \quad (177)$$

$$F_{13} = -\frac{1}{2} \sqrt{(F_{11} F_{33})} \quad (178)$$

せん断試験

- 平面1-2でのせん断試験：

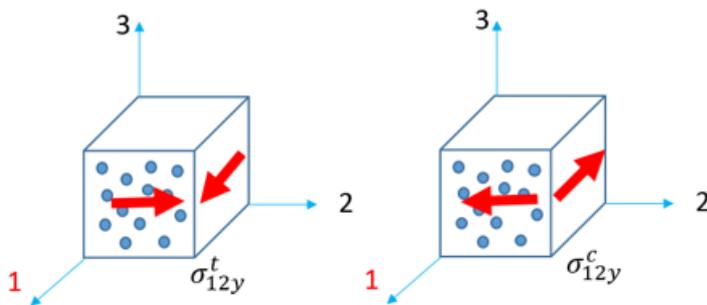


図 226:

σ_{12y}^t および σ_{12y}^c は以下のサンプル試験の結果であり得る：

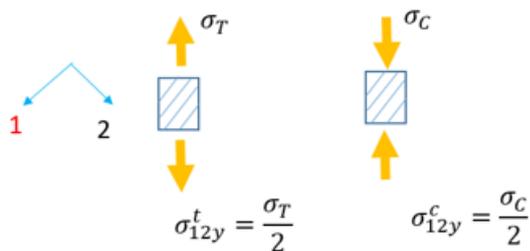


図 227:

$$F_{44} = \frac{1}{\sigma_{12y}^c \sigma_{12y}^t} \quad (179)$$

- 平面1-3でのせん断

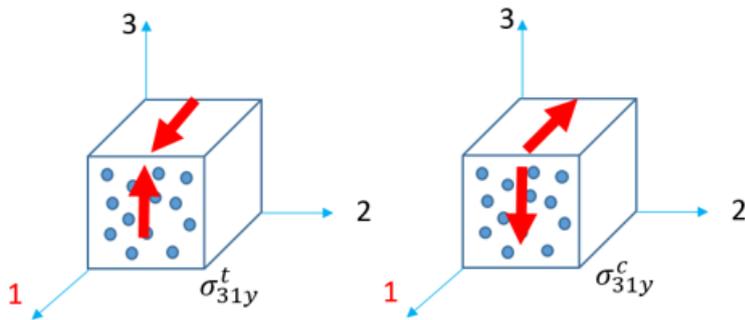


図 228:

σ_{31y}^t および σ_{31y}^c は以下のサンプル試験の結果であり得る:

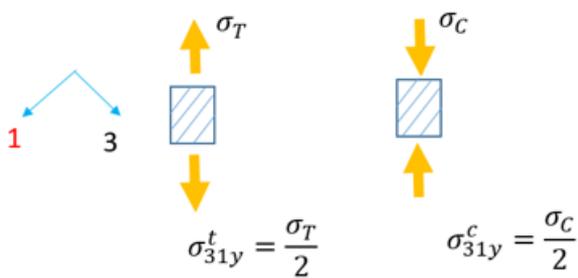


図 229:

$$F_{66} = \frac{1}{\sigma_{31y}^c \sigma_{31y}^t} \tag{180}$$

- 平面2-3でのせん断:

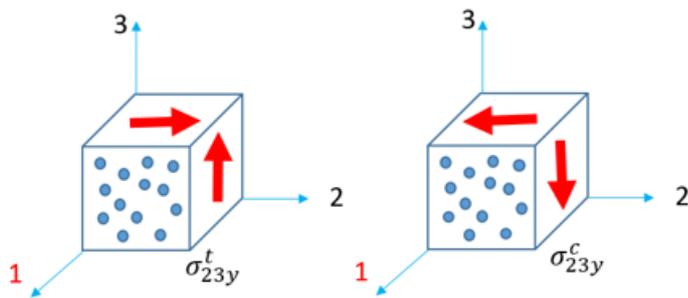


図 230:

$$F_{55} = \frac{1}{\sigma_{23y}^c \sigma_{23y}^t} \tag{181}$$

Tsai-Wu基準の計算には、LAW12およびLAW14の以下に示すパラメータが要求されます:

σ_{1y}^t	σ_{2y}^t	σ_{1y}^c	σ_{2y}^c
σ_{12y}^t	σ_{12y}^c	σ_{23y}^t	σ_{23y}^c
σ_{3y}^t	σ_{3y}^c	σ_{13y}^t	σ_{13y}^c

→ Additional parameters in LAW12

図 231:

Tsai-Wuの降伏曲面は、 $F(\sigma) = 1$ です。 $(F(\sigma) \leq 1)$ である限り、材料は弾性相にあります。 $(F(\sigma) > 1)$ になると降伏曲面を超え、材料は非線形相となります。

これら2つの材料則では、降伏曲面には次の係数も考慮する場合があります。

- 塑性仕事 W_p とパラメータ B および n
- ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ とパラメータ $\dot{\epsilon}_0$ および c

$$F(W_p, \dot{\epsilon}) = (1 + BW_p^n) \left(1 + c \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \tag{182}$$

これで、降伏曲面は $F(\sigma) = F(W_p, \dot{\epsilon})$ となります。

- 右記の場合、材料は弾性相になります; $F(\sigma) \leq F(W_p, \dot{\epsilon})$
- 右記の場合、材料は非線形相になります; $F(\sigma) > F(W_p, \dot{\epsilon})$

この降伏曲面 $F(W_p, \dot{\epsilon})$ は、 f_{\max} ($F(W_p, \dot{\epsilon}) \leq f_{\max}$) によって制限されます。ここで、 f_{\max} は Tsai-Wu 基準制限の最大値です。

$$f_{\max} = \left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_y} \right)^2$$

パラメータ B 、 n 、 c および $\dot{\epsilon}_0$ により、降伏曲面は $1 \sim f_{\max}$ となります。

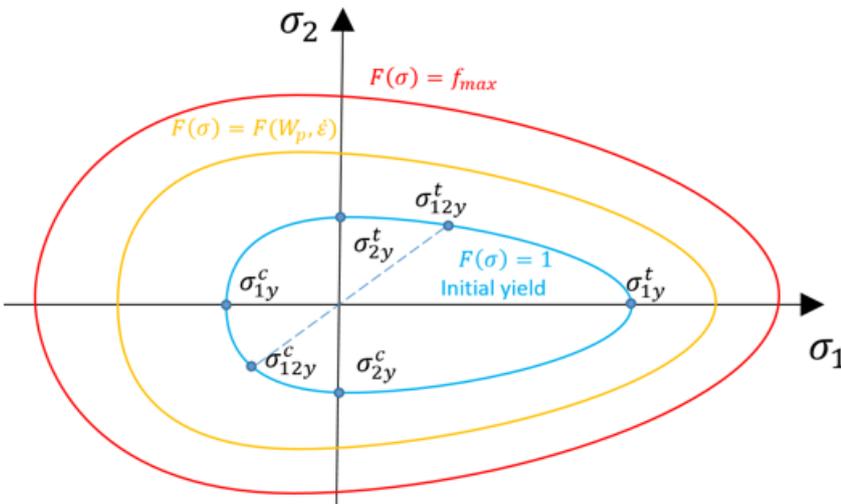


図 232: 1-2平面のTsai-Wu降伏基準

LAW25 (Tsai-WUおよびCRASURV)

LAW25は、Radiossにおいて最も一般的に用いられている複合材です。これは、シェル要素とソリッド要素に使用できます。LAW25では、Tsai-WuとCRASURVの2つの定式化を使用できます。

弾性相

弾性相では、異方性材料の記述に、ヤング率(3パラメータ)、せん断係数(3パラメータ)、およびポアソン比(1パラメータ)が必要となります。

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & -\frac{\nu_{12}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{E_{22}} & -\frac{\nu_{12}}{E_{22}} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{2G_{12}} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1}{2G_{23}} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{2G_{31}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{bmatrix} \quad (183)$$

symm.

I_{form}FORM=0 および =1の場合のTsai-Wu降伏基準

LAW25におけるTsai-Wu降伏曲面は、次のように6つの係数で定義されます：

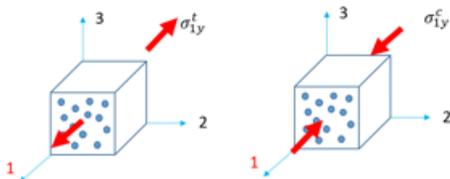
$$\begin{aligned} & \mathbf{I}_{form} \mathbf{FORM} = 0: \text{Tsai-Wu} & \mathbf{I}_{form} \mathbf{FORM} = 1: \text{CRASURV} (F(W_p^*, \dot{\varepsilon}, \sigma) \leq 1) \\ & (F(\sigma) \leq F(W_p^*, \dot{\varepsilon})) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F(\sigma) = & F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{44} (W_p^*, \dot{\varepsilon}) \sigma_1^2 + 2F_{12} (W_p^*, \dot{\varepsilon}) \sigma_1 \sigma_2 + F_{21} (W_p^*, \dot{\varepsilon}) \sigma_1^2 \\ & + F_{22} (W_p^*, \dot{\varepsilon}) \sigma_2^2 + F_{44} (W_p^*, \dot{\varepsilon}) \sigma_1^2 + 2F_{12} (W_p^*, \dot{\varepsilon}) \sigma_1 \sigma_2 \end{aligned}$$

降伏における材料をチェックするには、Tsai-Wu ($I_{form} \mathbf{FORM} = 0$) では $F(\sigma)$ が各応力状態での $F(W_p^*, \dot{\varepsilon})$ と比較され、CRASURV ($I_{form} \mathbf{FORM} = 1$) では $F(W_p^*, \dot{\varepsilon})$ が各応力状態での1と単に比較されます。

これら6つの係数は、次の試験の降伏応力により決定することもできます：

- 引張り / 圧縮試験
 縦方向引張り / 圧縮試験 (方向1、繊維方向)



$$\begin{aligned} & \mathbf{I}_{form} \mathbf{FORM} = 0: \text{Tsai-Wu} & \mathbf{I}_{form} \mathbf{FORM} = 1: \text{CRASURV} (F(W_p^*, \dot{\varepsilon}, \sigma) \leq 1) \\ & (F(\sigma) \leq F(W_p^*, \dot{\varepsilon})) \end{aligned}$$

$$F_1 = -\frac{1}{\sigma_{1y}^c} + \frac{1}{\sigma_{1y}^t} \qquad F_1(W_p^*, \dot{\varepsilon}) = -\frac{1}{\sigma_{1y}^c(W_p^*, \dot{\varepsilon})} + \frac{1}{\sigma_{1y}^t(W_p^*, \dot{\varepsilon})}$$

I_{form}FORM = 0: Tsai-Wu
($F(\sigma) \leq F(W_p^*, \dot{\epsilon})$)

$$F_{11} = \frac{1}{\sigma_{1y}^c \sigma_{1y}^t}$$

$$F(W_p^*, \dot{\epsilon}) = (1 + b(W_p^*)^n) \cdot \left(1 + c \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right)$$

ここで、 $W_p^* = \frac{W_p}{W_p^{ref}}$

I_{form}FORM = 1: CRASURV ($F(W_p^*, \dot{\epsilon}, \sigma) \leq 1$)

$$F_{11}(W_p^* \cdot \dot{\epsilon}) = \frac{1}{\sigma_{1y}^c(W_p^* \cdot \dot{\epsilon}) \cdot \sigma_{1y}^t(W_p^* \cdot \dot{\epsilon})}$$

引張の場合:

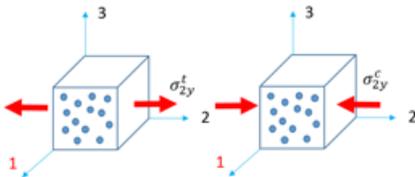
$$\sigma_{1y}^t(W_p^* \cdot \dot{\epsilon}) = \sigma_{1y}^t \left(1 + b_1^t(W_p^*)^{n_1}\right) \left(1 + c_1^t \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right)$$

圧縮の場合:

$$\sigma_{1y}^c(W_p^* \cdot \dot{\epsilon}) = \sigma_{1y}^c \left(1 + b_1^c(W_p^*)^{n_1}\right) \left(1 + c_1^c \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right)$$

ここで、 $W_p^* = \frac{W_p}{W_p^{ref}}$

横方向引張り / 圧縮試験(方向2)



I_{form}FORM = 0: Tsai-Wu
($F(\sigma) \leq F(W_p^*, \dot{\epsilon})$)

$$F_2 = -\frac{1}{\sigma_{2y}^c} + \frac{1}{\sigma_{2y}^t}$$

$$F_{22} = \frac{1}{\sigma_{2y}^c \sigma_{2y}^t}$$

ここで、 $W_p^* = \frac{W_p}{W_p^{ref}}$

I_{form}FORM = 1: CRASURV ($F(W_p^*, \dot{\epsilon}, \sigma) \leq 1$)

$$F_2(W_p^* \cdot \dot{\epsilon}) = -\frac{1}{\sigma_{2y}^c(W_p^* \cdot \dot{\epsilon})} + \frac{1}{\sigma_{2y}^t(W_p^* \cdot \dot{\epsilon})}$$

$$F_{22}(W_p^* \cdot \dot{\epsilon}) = \frac{1}{\sigma_{2y}^c(W_p^* \cdot \dot{\epsilon}) \cdot \sigma_{2y}^t(W_p^* \cdot \dot{\epsilon})}$$

引張の場合:

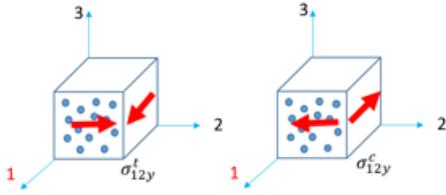
$$\sigma_{2y}^t(W_p^* \cdot \dot{\epsilon}) = \sigma_{2y}^t \left(1 + b_2^t(W_p^*)^{n_2}\right) \left(1 + c_2^t \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right)$$

圧縮の場合:

$$\sigma_{2y}^c(W_p^* \cdot \dot{\epsilon}) = \sigma_{2y}^c \left(1 + b_2^c(W_p^*)^{n_2}\right) \left(1 + c_2^c \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right)$$

ここで、 $W_p^* = \frac{W_p}{W_p^{ref}}$

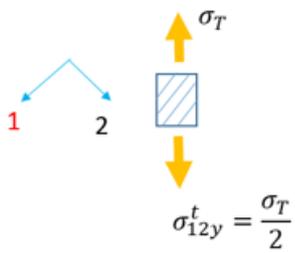
- せん断試験
平面1-2でのせん断



I_{form}FORM = 0: Tsai-Wu
 $(F(\sigma) \leq F(W_p^*, \dot{\epsilon}))$

$$F_{44} = \frac{1}{\sigma_{12y}^c \sigma_{12y}^t}$$

σ_{12y}^t , および σ_{12y}^c はサンプル試験の結果であり得る:



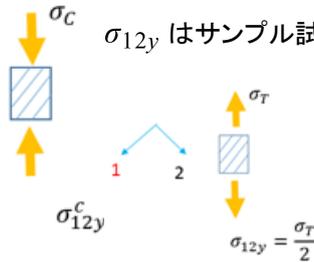
I_{form}FORM = 1: CRASURV ($F(W_p^*, \dot{\epsilon}, \sigma) \leq 1$)

$$F_{44}(W_p^*, \dot{\epsilon}) = \frac{1}{\sigma_{12y}(W_p^*, \dot{\epsilon}) \cdot \sigma_{12y}(W_p^*, \dot{\epsilon})}$$

せん断の場合:

$$\sigma_{12y}(W_p^*, \dot{\epsilon}) = \sigma_{12y} \left(1 + b_{12}(W_p^*)^{n_{12}} \right) \left(1 + c_{12} \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right)$$

σ_{12y} はサンプル試験の結果であり得る:



$$F(W_p^*, \dot{\epsilon}) = (1 + b(W_p^*)^n) \cdot \left(1 + c \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right)$$

ここで、 $W_p^* = \frac{W_p}{W_p^{ref}}$

- 相互作用係数

I_{form}FORM = 0: Tsai-Wu ($F(\sigma) \leq F(W_p^*, \dot{\epsilon})$)

I_{form}FORM = 1: CRASURV ($F(W_p^*, \dot{\epsilon}, \sigma) \leq 1$)

$$F_{12} = -\frac{\alpha}{2} \sqrt{F_{11} F_{22}}$$

一般には、デフォルトの減少係数、 $\alpha = 1$ が使用されます。

$$F(W_p^*, \dot{\epsilon}) = (1 + b(W_p^*)^n) \cdot \left(1 + c \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right)$$

ここで、 $W_p^* = \frac{W_p}{W_p^{ref}}$

$$F_{12}(W_p^*, \dot{\epsilon}) = -\frac{\alpha}{2} \sqrt{F_{11}(W_p^*, \dot{\epsilon}) F_{22}(W_p^*, \dot{\epsilon})}$$

一般には、デフォルトの減少係数、 $\alpha = 1$ が使用されます。

Tsai-Wuでは、相対塑性仕事 W_p^* を使用して降伏曲面を計算します。CRASURVでは、相対塑性仕事は降伏応力の計算に使用されます。

I_{form}FORM = 0: Tsai-Wu
 $(F(\sigma) \leq F(W_p^*, \dot{\epsilon}))$

$$F(\sigma) \leq F(W_p^*, \dot{\epsilon})$$

ここで、

$$F(W_p^*, \dot{\epsilon}) = (1 + b(W_p^*)) * \left(1 + c \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right)$$

ここで、 $W_p^* = \frac{W_p}{W_p^{ref}}$

右記の場合、材料は弾性相;
 $F(\sigma) \leq F(W_p^*, \dot{\epsilon})$

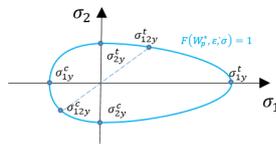
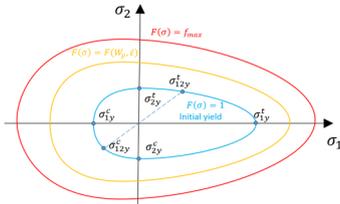
右記の場合、材料は非線形相;
 $F(\sigma) > F(W_p^*, \dot{\epsilon})$

I_{form}FORM = 1: CRASURV ($F(W_p^*, \dot{\epsilon}, \sigma) \leq 1$)

$$F(W_p^*, \dot{\epsilon}, \sigma) \leq 1$$

右記の場合、材料は弾性相; $F(W_p^*, \dot{\epsilon}, \sigma) \leq 1$

右記の場合、材料は非線形相; $F(W_p^*, \dot{\epsilon}, \sigma) > 1$



降伏応力限度 $F(W_p^*, \dot{\epsilon})$ のは右記の範囲
 です; $1 \sim f_{max}$

LAW25 (Tsai-Wu および CRASURV) では、損傷が全ひずみと最大損傷係数の関数になります。

全ひずみが $\epsilon > \epsilon_f$ 、または面外ひずみが $\gamma_{ini} < \gamma < \gamma_{max}$ の場合、材料は次の方法により軟化します:

$$\sigma_{reduce} = \sigma \cdot (1 - d_i) \tag{184}$$

で、 $i=1,2,3$

ここで、 d_i は損傷係数で、以下のように定義されます:

$$d_i = \min\left(\frac{\epsilon_i - \epsilon_{ti}}{\epsilon_i} \cdot \frac{\epsilon_{mi}}{\epsilon_{mi} - \epsilon_{ti}}, d_{max}\right) \tag{185}$$

ここで、 $i=1,2$

$$d_3 = \min\left(\frac{\gamma - \gamma_{ini}}{\gamma_{max} - \gamma_{ini}} \cdot \frac{\gamma_{max}}{\gamma}, d_{3max}\right) \tag{186}$$

in direction 3 (delamination)

- If the total strain is between $\epsilon_t < \epsilon < \epsilon_f$, the material begins to soften, but this damage is reversible. Once $\epsilon > \epsilon_f$, then the damage is irreversible and if $\epsilon \geq \epsilon_{mr}$ then stress in material is reduced to 0.
- Damage could be in elastic phase or in plastic phase. It depends on which phase ϵ_t and ϵ_f are defined in.

- Element deletion is controlled by $I_{off}OFF$. Select a different $I_{off}OFF$ option to control the criteria of element deletion. For additional information, refer to $I_{off}OFF$ in LAW25 in the Reference Guide.

LAW19とLAW58(布用)

Radiossには、布のモデリング用に2つの材料則LAW19とLAW58が用意されています。LAW19は弾性直交異方性材料で、/PROP/TYPE9と組み合わせて使用する必要があります。LAW58は超弾性異方性繊維材料で、/PROP/TYPE16と組み合わせて使用する必要があります。

縦糸方向と横糸方向の結合をこの材料則に定義して、繊維間の物理的な相互作用を再現することもできます。どちらの材料則も、エアバッグのモデリングによく使用されます。

LAW58では、応力-ひずみ挙動を定義するため、2つの方法が用意されています。

- 縦糸、横糸、およびせん断挙動を定義する非線形関数(fct_ID_i)曲線
- ヤング率、軟化係数 B 、ひずみ矯正 S_i および繊維曲げ率減少係数 $Flex_i$

縦糸方向と横糸方向において:

$$\sigma_{ii} = E_i \varepsilon_{ii} - \frac{(B_i \varepsilon_{ii}^2)}{2} \quad (i = 1, 2) \text{ when } \frac{d\sigma}{d\varepsilon} > 0$$

$$\sigma_{ii} = \max_{\varepsilon_{ii}} \left(E_i \varepsilon_{ii} - \frac{(B_i \varepsilon_{ii}^2)}{2} \right) \quad (i = 1, 2) \text{ when } \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \leq 0$$

初期状態での面内せん断には、 G_0 を使用します。 α (縦糸方向と横糸方向の間の角度)が α_T (せん断ロック角度)に達したら、 G_T を使用して矯正を記述します。

$$\tau = G_0 \tan(\alpha) - \tau_0 \text{ 右記の場合; } \alpha \leq \alpha_T$$

$$\tau = \frac{G_T}{1 + \tan^2(\alpha_T)} \tan(\alpha) + \left(G_0 - \frac{G_T}{1 + \tan^2(\alpha_T)} \right) \tan(\alpha_T) - \tau_0, \text{ 右記の場合; } \alpha > \alpha_T$$

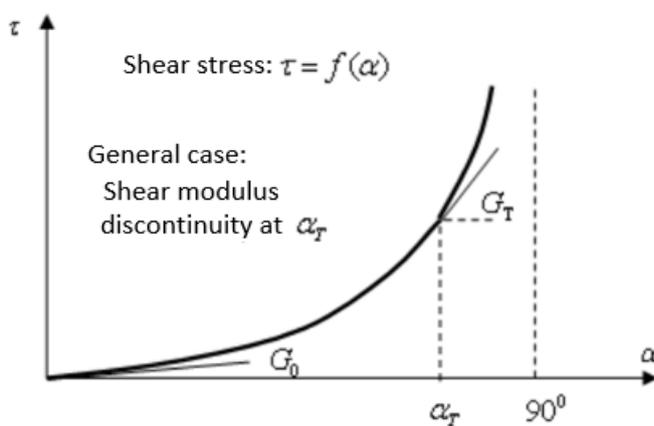


図 233:

面外せん断応力-ひずみは、 G_{sh} を使用して記述します。

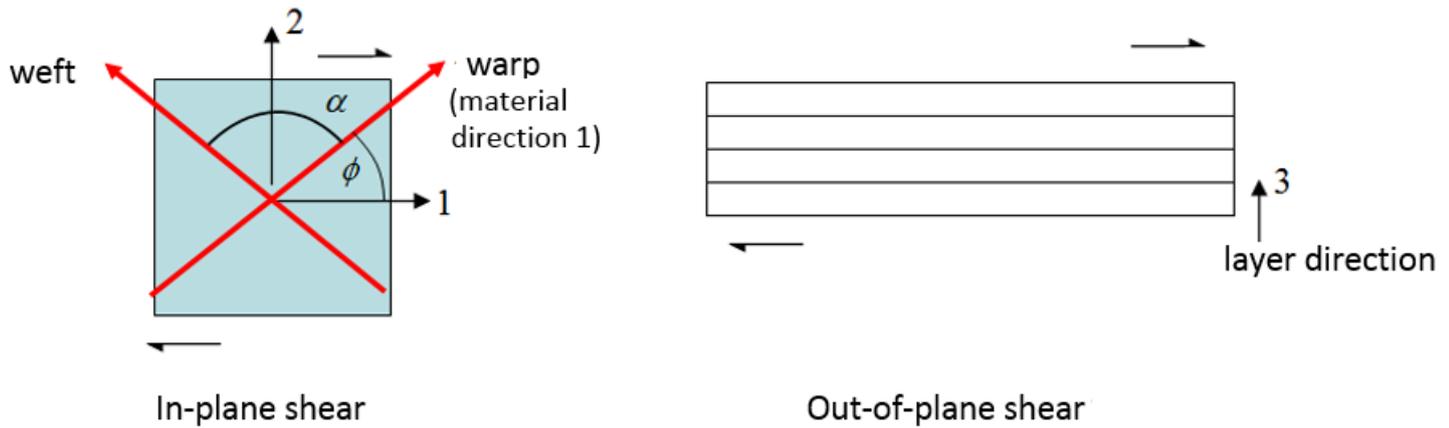


図 234:

布の場合、引張りの初めに真っ直ぐなプロセスがあります。このフェーズにおいては未だタイトになっていないため、繊維は非常に柔らかいです。

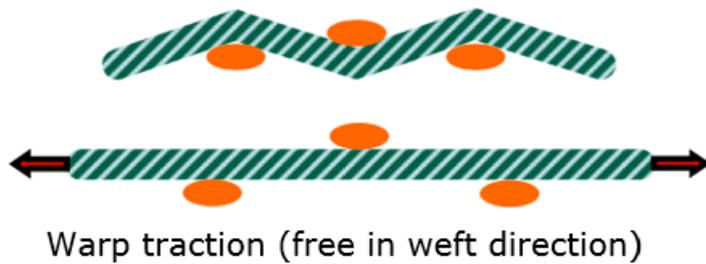


図 235:

LAW58, では、 $Flex_i$ を使用してこの挙動を記述します:

$$E_{fi} = Flex_i * E_i \tag{187}$$

布がタイトになった(ひずみ矯正 S_i に到達)すると、通常の繊維の弾性 E_i を使用することもできます。

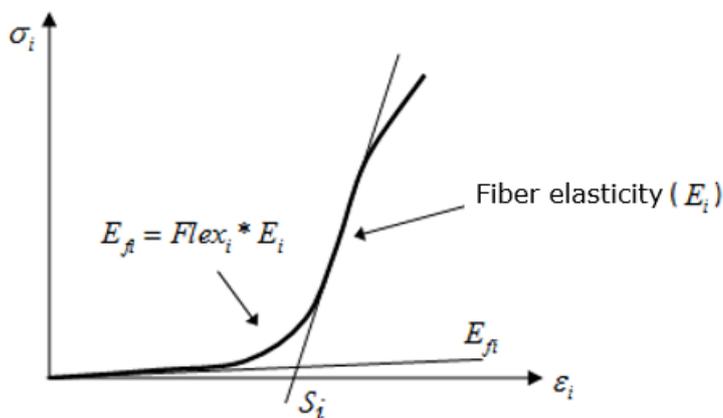


図 236:

複合材モデリング

Radiossで使用する複合材モデリングテクニック

各層に少なくとも**1**つのソリッド

モデルが大きく、高精度な結果が得られますがより多くの計算リソースが必要になります。

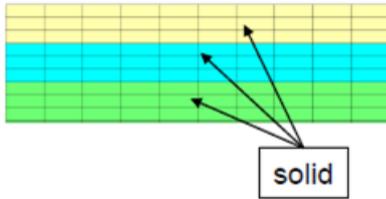


図 237:

複合アプローチ(中間層の厚み)

上面層と底面層のシェル、および中間層のソリッドを定義します。

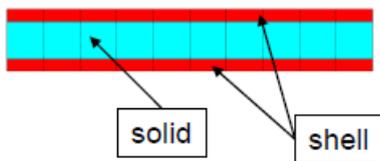


図 238:

サンドイッチシェルアプローチ

厚み全体で1つのシェル要素のみを使用します。さまざまな材料を使用して複数の層を定義します。

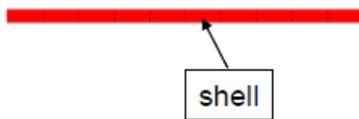


図 239:

複合シェルモデリングでは、2種類の問題があります。

- 1つ目は、等方性層がある複合シェルです(z方向の直交異方性)。例えば、ウィンドシールドモデリングによるものです。ここでは、材料のLAW27(PLAS_BRIT)またはLAW36(PLAS_TAB)を使用できます。
- 2つ目は、直交異方性層がある複合シェルです(x、y、およびz方向の直交異方性)。例えば、外側の繊維ガラス層と内側のフォーム層のサンドイッチシェルです。ここでは、材料のLAW25(COMPSH)、およびQEPH以外のすべてのシェル定式化を使用できます。

複合材特性

複合材は、ソリッドまたはシェル要素でモデル化できます。Radiossでは、要素タイプに応じ、以下のプロパティを用いて複合材をモデル化することが可能です。

シェル要素

Radiossでの複合材のモデリングは、異なるプロパティを伴う層(レイヤー)ベースまたは積層(プライ)ベースで定義することができます。

- /PROP/TYPE10 (SH_COMP)、/PROP/TYPE11 (SH_SANDW)を伴う層ベースのモデリング
- /PROP/TYPE17 (STACK)、/PROP/TYPE51、/PROP/PCOMPP+/STACK、/PROP/TYPE19 (PLY)、/PLYを伴うプライベースのモデリング

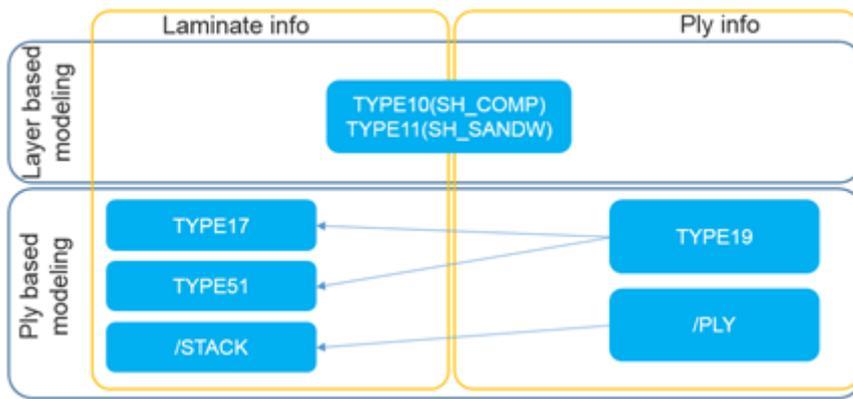


図 240:

プライベースのモデリングについて、/PROP/TYPE19(または/PLY)で定義され、オプションPply_ID_i付きで/PROP/TYPE17または/PROP/TYPE51(または/STACK)でアセンブルされる各プライに関する情報(材料、板厚、異方性の角度、異方性軸角度、積分点の数など)。

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Pply_ID _i	ϕ_i		Z _i						

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
/PROP/TYPE19/prop_ID/unit_ID or /PROP/PLY/prop_ID/unit_ID									
prop_title									
mat_ID	t	$\Delta\phi$	grsh4n_ID	grsh3n_ID	Npt_ply				a _i

図 241:

プライベースのモデリングについては、プライをアセンブルする方法は、“by ply”(プライ毎)または“by substack”(サブスタック毎)が可能です。“by ply”は単に、プライを一つ一つ下から上へと積み上げます。“by substack”の方法ではまずプライを一つ一つ積み上げて各サブスタックを作成し、続いて各サブスタックを結合するか、もしくはサブスタック結合“INT”で並べることが可能です。



図 242:

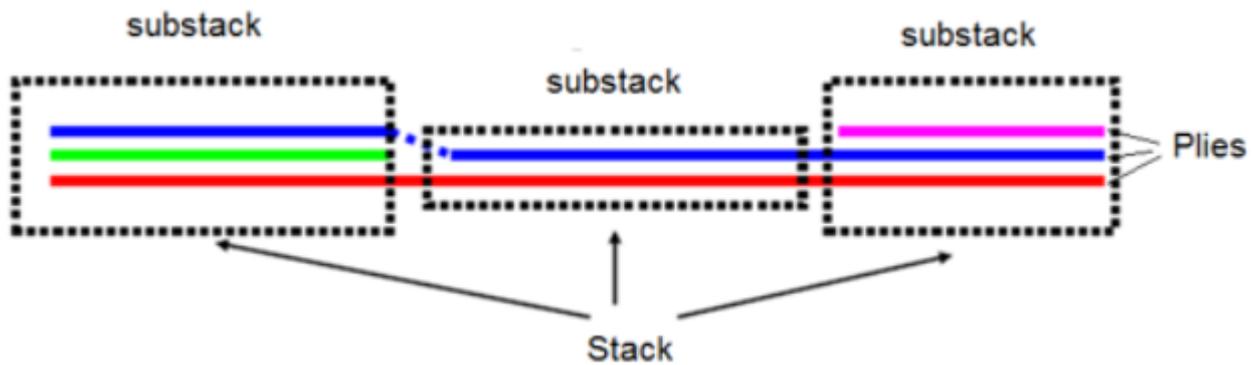


図 243: /PROP/TYPE51での並べ

複合材プロパティについては、以下のトピックがあります:

- 各層(プライ)の層(プライ)番号と積分点
- 層(プライ)内の異方性
- 層(プライ)の厚さと位置
- 層(プライ)に用いられる複合材料

	層ベースのプロパティ	
	/PROP/TYPE10 (SH_COMP)	/PROP/TYPE11 (SH_SANDW)
N 層番号 またはPply_ID _i プライ番号	N=0~100	N=1~100
各層 / プライのIP	層毎に1	層毎に1

	層ベースのプロパティ	
	/PROP/TYPE10 (SH_COMP)	/PROP/TYPE11 (SH_SANDW)
<i>Iint</i> 積分定式化		
$\phi_i + \mathbf{V}$ 異方性方向	✓	✓
$\phi_i + \text{skew}$ 異方性方向		✓
θ_{drape} プライ方向の変化		
α_i 異方性軸間の角度		
t_i 層 / プライ厚		✓
$I_{\text{pos}} \text{POS} + Z_i$ 層 / プライ位置		✓
$I_{\text{pos}} \text{POS} = 2, 3, 4$ 層 / プライオフセット		
mat_ID_i 各層 / プライの材料	/PARTで定義された使用材料	✓ すべての相に同じ材料を用いる必要あり
一般的に使用される複合材料則	15、25およびユーザー材料	15、25およびユーザー材料
XFEM適合性(亀裂伝播)		✓ /FAIL/JOHNSON、/FAIL/TAB1および/FAIL/TBUTCHERで
<i>Plyxfem</i> 層 / プライ間の剥離		
<i>Minterply</i>		

	層ベースのプロパティ	
	/PROP/TYPE10 (SH_COMP)	/PROP/TYPE11 (SH_SANDW)
層 / プライ間の材料		

	プライベースのプロパティ		
	/PROP/TYPE17 + / PROP/TYPE19	/PROP/TYPE51 + / PROP/TYPE19	/PROP/PCOMPP+/ STACK+/PLY
<i>N</i> 層番号 または <i>Pply_ID_i</i> プライ番号	<i>Pply_ID_i</i> =1~200	<i>Pply_ID_i</i> =1~200	<i>Pply_ID_i</i> 1~n
各層 / プライのIP	プライ毎に1 <i>Npt_ply</i> =1 in /PROP/ TYPE19	プライ毎に1~9 <i>Npt_ply</i> =1~9 in / PROP/TYPE19	プライ毎に1~9 <i>Npt_ply</i> =1~9 in /PLY
<i>Iint</i> 積分定式化		√ 均一またはガウス	√ 均一またはガウス
$\phi_i + \mathbf{V}$ 異方性方向	√	√	√
$\phi_i + \text{skew}$ 異方性方向	√	√	√
θ_{drape} プライ方向の変化	√ /PROP/TYPE19で定義	√ /PROP/TYPE19で定義	√ /PLYで定義
α_i 異方性軸間の角度	√ (/PROP/TYPE19の)	√ (/PROP/TYPE19の)	√ /PLYの
<i>t_i</i> 層 / プライ厚	√ /PROP/TYPE19で異なる	√ /PROP/TYPE19で異なる	√ /PLYで異なる
<i>I_{pos}</i> POS + <i>Z_i</i> 層 / プライ位置	√	√	√

	プライベースのプロパティ		
	/PROP/TYPE17 + /PROP/TYPE19	/PROP/TYPE51 + /PROP/TYPE19	/PROP/PCOMPP+/STACK+/PLY
$I_{pos}POS=2, 3, 4$ 層 / プライオフセット	√	√	√
mat_ID_i 各層 / プライの材料	√ すべてのプライに同じ材料を用いる必要あり	√ 各プライに異なる材料タイプが可能	√ 各プライに異なる材料タイプが可能
一般的に使用される複合材料則	25、27、36、60、72、93およびユーザー材料	25、≥28およびユーザー材料	25およびユーザー材料
XFEM適合性(亀裂伝播)		√ (/FAIL/JOHNSONおよび/FAIL/TBUTCHER)	
$Plyxfem$ 層 / プライ間の剥離	√		
$Minterply$ 層 / プライ間の材料	√ LAW1+/FAIL/ LAD_DAMのみ		

各層(プライ)の層(プライ)番号N($Nply_ID_i$)と積分点

/PROP/TYPE10、/TYPE11を使用した層ベースのモデリングについて。Nは、シェルの板厚方向の層の数です。これらのプロパティに関し、各層に1つの積分点(IP)があります。

/PROP/TYPE17、/TYPE51および/PCOMPPを使用したプライベースのモデリングについて。 $Pply_ID_i$ は、シェルの板厚方向のプライの数です。プライは、各プロパティについてn個の層まで組み合わせることが可能です。

TYPE17には積分点は1個のみが可能ですが、TYPE51と/STACKFについては9個までの積分点が可能です。プロパティTYPE19または/PLYでオプション" Npt_ply "により定義された積分点の数。

例(プライ) (/PROP/TYPE51)

この例では、/PROP/TYPE19で定義された $Npt_ply=3$ はプライ毎に3個の積分点を意味し、/PROP/TYPE51でオプション $I_{int}INT=0$ で定義されると、これら3個の積分点は各プライ板厚を通して均等に分布されます。

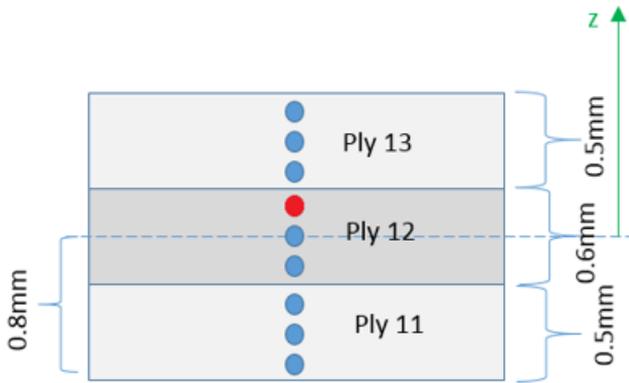


図 244:

/PROP/TYPE51で $I_{int}INT=1$ であると、積分点は各プライ板厚を通してForces and Moments Calculation Gauss Integration Schemeに従って分布されます。

Uniform distribution (IP - equally spaced) Gaussian distribution (recommended for bending)



図 245:

ANIM/SHELL/IDPLY/Keyword4/I/J(または/ANIM/SHELL/Keyword3/N/NIP)で、特定の各積分点でのアニメーション結果(塑性ひずみ、損傷、応力およびひずみテンソル)を出力することが可能です。

たとえば、2番目のプライ(プライ名 Ply12)の3番目の積分点(図 245において赤くハイライト表示されている積分点)での塑性ひずみを出力するには、/ANIM/SHELL/IDPLY/EPSP/2/3(または/ANIM/SHELL/EPSP/2/3)を使用します。各複合材プロパティについてシェル板厚を通した積分点の出力情報は、FAQのシェル応力テンソルのアニメーション出力をご参照ください。

層(プライ)内の異方性

- 材料の1つ目の異方性方向は、角度 ϕ および全体ベクトル $V(V_x, V_y, V_z)$ で定義できます。また、角度 ϕ とスキューを用いることも可能です。この場合、全体ベクトル V と置き換えられるスキューのx軸。

シェル要素内の全体ベクトル V を投影し、 ϕ 度回転させたものが、1つ目の異方性方向(材料方向1とも呼ばれる)です。 ϕ の正方向は、シェルの法線 n の符号となります。たとえば、図 246で反時計回りに ϕ 度回転させると、材料方向1となります。

局所要素参照の材料方向1は通常、繊維方向です。そこで、材料則で定義されている方向1の材料特性(ヤング率E、降伏応力など)を局所要素参照で正しい方向に適用することができます。

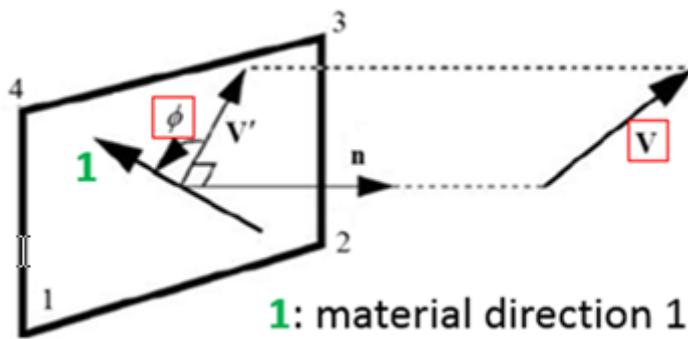


図 246:

- 複合材材料は、直交異方性または異方性のいずれかであり得ます。Radiossではこの機能を、積層ベースのプロパティ内で異方性軸角度 α_i で表すことができます。 $\alpha_i = 90^\circ$ である場合は、直交異方性材料を表します。層ベースのプロパティ(TYPE10およびTYPE11)はこのオプション α_i がないため、直交異方性材料のみが定義可能です。

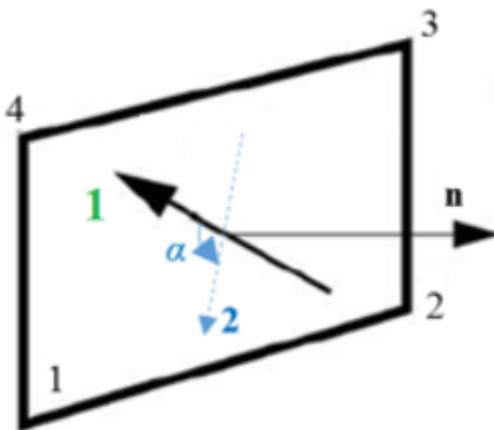


図 247:

図 248 は、全体ベクトルVを定義するためにスキューを使用する/PROP/TYPE11での例を示しています。

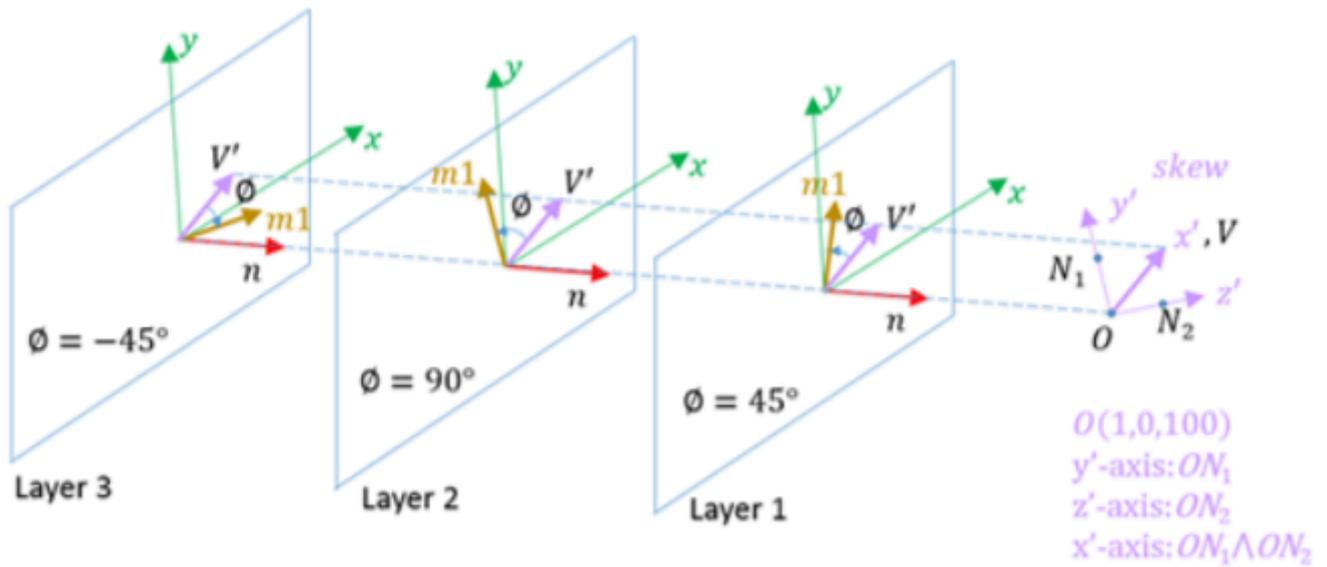


図 248:

プロパティTYPE11およびTYPE51については、一部のシェルの異方性方向は、キーワード/INISHE/ORTH_LOCまたは/INISH3/ORTH_LOC内の ϕ で初期化することも可能です。プロパティTYPE51では、異方性軸角度もこれらのキーワードで初期化できます。

- 特定のシェル要素またはシェル要素グループの異方性の向きもまた、/PROP/TYPE19内のオプション $drape_ID$ と def_orth 、および/DRAPE内で定義される/PLY/DRAPEで $drape_ID$ が指定されます。この機能により、異方性方向の角度は θ_{drape} で変更することができます。

- $def_orth=1$ を使用する場合:

角度 ϕ_i 、スキューまたは全体ベクトル V は無視されます。シェルの局所x軸をベクトル V' とし、 ϕ 度回転させたものが1つ目の異方性方向です。 ϕ_s (/SHELLまたは/SH3Nで定義される) は、計算角度 ϕ によって考慮されます。

$$\phi = \phi_s + \Delta\phi + \theta_{drape} \tag{188}$$

- $def_orth=2$ (デフォルト) を使用する場合:

シェル要素内の全体ベクトル V をベクトル V' に投影し、 ϕ 度回転させたものが1つ目の異方性方向です。角度 ϕ は次のように計算されます:

$$\phi = \phi_i + \Delta\phi + \theta_{drape} \tag{189}$$

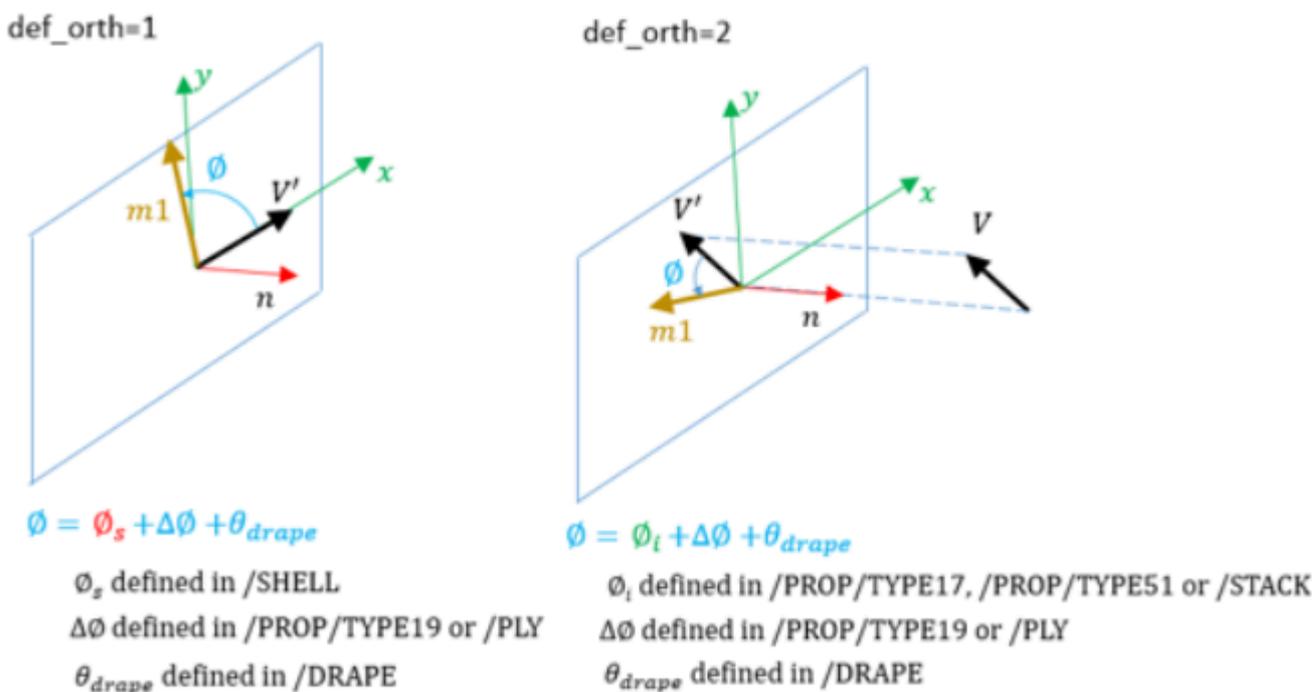


図 249:

層(プライ)の厚さと位置

- /PROP/TYPE10については、層の厚さは単に以下の層の数によって平均化され、

$$t_i = Thick / N \tag{190}$$

層は自動的に一つ一つ下から上へと積み上げられます。

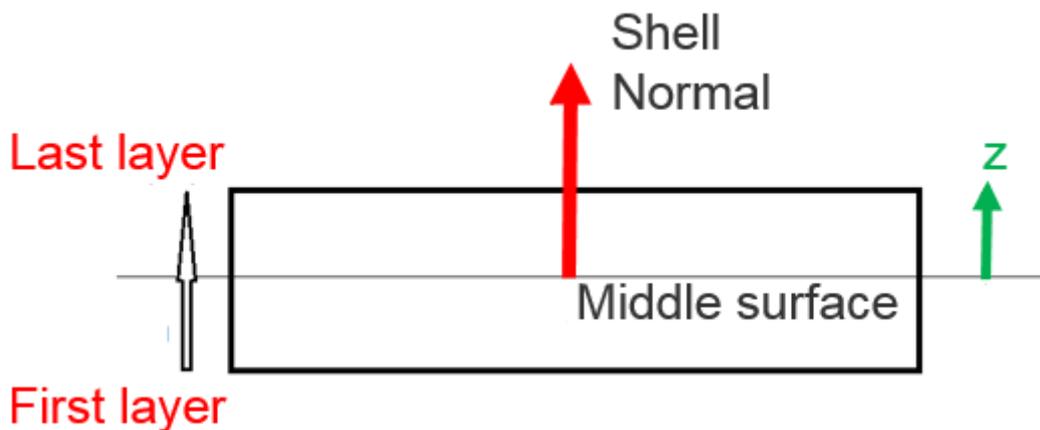


図 250:

- プロパティTYPE11、TYPE17、TYPE51および/STACKについては、層(プライ)の位置と厚さはオプションI_posPOSに依存します。
 - I_posPOS=0の場合

ユーザーの層(プライ)の厚さ t_i が入力とされ、層(プライ)の位置は自動的に一つ一つ下から上へと積み上げられます。しかし、

$$\sum_i t_i \neq Thick \tag{191}$$

の場合、層(プライ)の厚さは次のとおりになるよう、 t_i^{new} に調整されます。

$$\sum_i t_i^{new} = Thick \tag{192}$$

層(プライ)の位置も同様に調整されます。

- $I_{pos}POS=1$ の場合

ユーザーの層(プライ)の厚さ t_i および位置 Z_i が入力とされ、層の厚さの合計は、 $Thick$ ではチェックされません。

追加の情報については、FAQの[層の板厚と位置の計算](#)をご参照ください。

- プロパティTYPE17、TYPE51および/STACKについては、プライを $I_{pos}POS=2, 3, 4$ でオフセットすることも可能です。

- $I_{pos}POS=2$: シェル要素の中央面は、プライレイアウトの底面から Z_0 の位置になります。



図 251:

- $I_{pos}POS=3$: プライレイアウトの最上面は、要素の中央面と一致します。

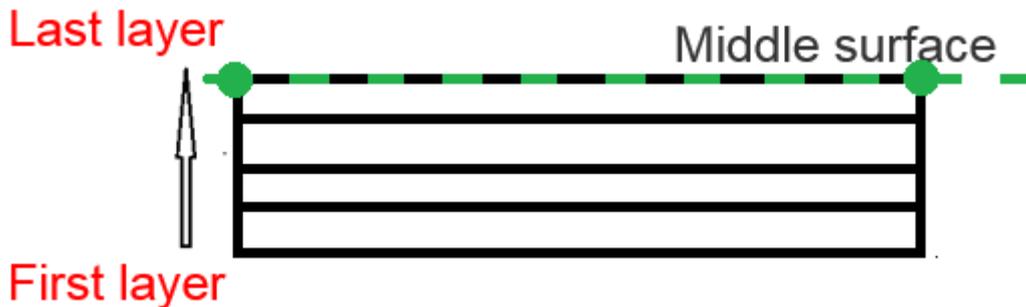


図 252:

- $I_{pos}POS=4$: プライレイアウトの底面が、要素の中央面と一致します。

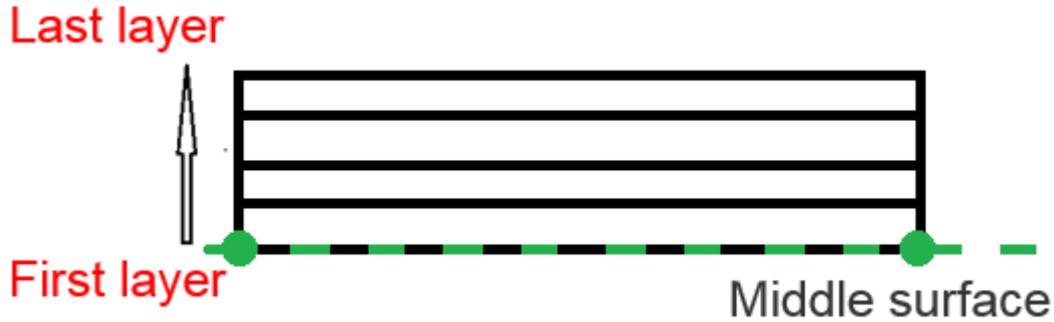


図 253:

- /PROP/TYPE17、/PROP/TYPE51、/STACKについては、プライの厚さは、/DRAPE(/PROP/TYPE19または/PLYで使用されている)内のオプション*Thinning*で変更できます。更新されたプライの厚さは次のようになります:

$$t_i^{new} = t_i \cdot Thinning \tag{193}$$

層(プライ)に用いられる複合材料

シェル要素には、複合材料LAW15およびLAW25を使用することができます。シェル要素の合成挙動を表すには、破壊モデル/FAIL/HASHIN、/FAIL/PUCKおよびLAW25での/FAIL/LAD_DAMAとLAW15での/FAIL/CHANGを用いることができます。詳細については、[複合材の材料](#)をご参照ください。

- 層 (プライ)間の材料
 - プロパティTYPE10については、複合材は/PARTで定義された材料を使用。
 - TYPE11およびTYPE17については、複合材はオプション*mat_ID_i*で定義された材料を使用。各層(プライ)に異なる材料IDを定義することが可能。しかしながら、それらは同じ材料タイプを使用しなくてはならない。LAW25を使用する場合、いくつかの異なるLAW25カードを別々の層(プライ)に用いることが可能。
 - プロパティTYPE51および/STACKについても、複合材はオプション*mat_ID_i*で定義された材料を使用し、異なる材料タイプおよびIDを各プライに用いることが可能。

• プライ間の材料

プロパティTYPE17については、プライ間の剥離を(*Plyxfem=2*)で定義することが可能。これは、剥離が主として複合材破壊に起因する場合に非常に役立ちます。*Minterply*で定義されるプライ間の材料。現時点では、プライ剥離の3つのタイプを表すために、LAW1+/FAIL/LAD_DAMを使用できます。

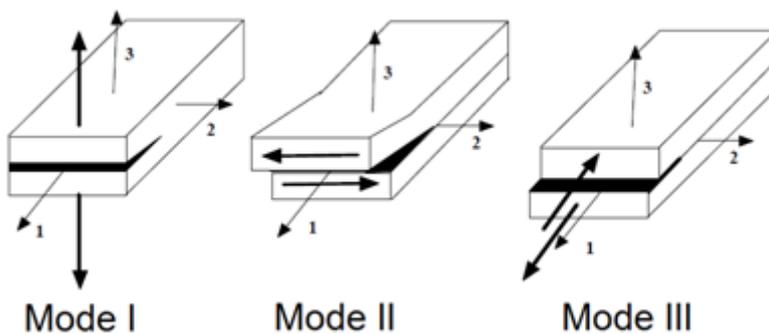


図 254:

この場合、プライ間の剥離破壊をシミュレートするために、追加の変数 δ_1 , δ_2 , δ_3 が、計算によりプライの各節点に加えられます。

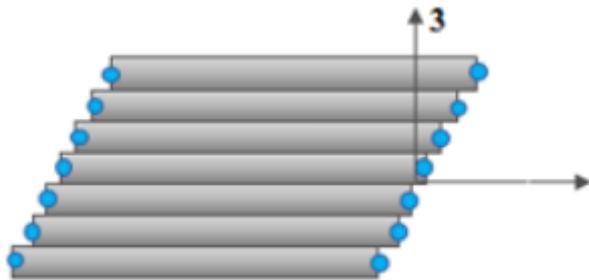


図 255:

ソリッド要素

シェル要素によるパートのモデリングでは十分でないため、新しい複合材テクノロジーではより多くのより厚いパートを生産できます。厚肉シェルでは、この問題を解決できます。シェル要素と比べても、厚肉シェルは他のソリッドパートと直接結合され得ます。

ソリッド要素については現時点で、プロパティ/PROP/TYPE22 (TSH_COMP) での層ベースのモデリングのみが使用できます。このソリッドプロパティは、複合材の定義により、シェルプロパティ/PROP/TYPE11に類似しています。

	層ベースのプロパティ	
	/PROP/TYPE22 (TSH_COMP)	
層番号	$I_{solid}SOLID=14:$ $I_{int}INT=9\sim 200$	$I_{solid}SOLID=15:$
各層 / プライのIP	$I_{npts}NPTS=ijk=2\sim 9$	$I_{npts}NPTS=j=1\sim 200$
積分定式化		
$\phi_i + \mathbf{V}$ 、異方性方向	√	
$\phi_i +$ スキュー、異方性方向	√	
θ_{drape} 、プライ方向の変化		
α_i 、異方性軸間の角度		
t_i 、層 / プライ厚	√ 右記の係数で定義: t_i/t	
$I_{pos}POS + Z_i$ 、層 / プライ位置	√	

	層ベースのプロパティ /PROP/TYPE22 (TSH_COMP)
$I_{pos}POS=2, 3, 4$, 層 / プライのオフセット	
mat_IDi , 各層 / プライの材料	✓ 各層に異なる材料タイプが可能
一般的に使用される複合材料則	LAW12、LAW14、LAW25およびユーザー材料
$Plyxfem$, 層 / プライ間の剥離	
$Minterply$, 層 / プライ間の材料	

- 各層の層番号と積分点

オプション $I_{int}INT$ を使用して定義された層番号。 $I_{int}INT$ は、層の数が9を超える場合にのみ $I_{solid}SOLID=14$ に対して使用されます。

この場合は、 $I_{npts}NPTS$ によって定義される板厚方向の積分点はゼロである必要があります。

例えば、s方向の100層という数の場合は、 $I_{cstr}CSTR = 010$ 、 $I_{npts}NPTS = 202$ 、 $I_{int}INT = 100$ です

- 層(プライ)内の異方性

プロパティ/PROP/TYPE11と同様、参照ベクトル V と角度 ϕ が、材料方向1の定義に使用されます。参照ベクトル V はソリッド要素の中央面に投影し、 ϕ 度回転させたものが材料方向1となります。

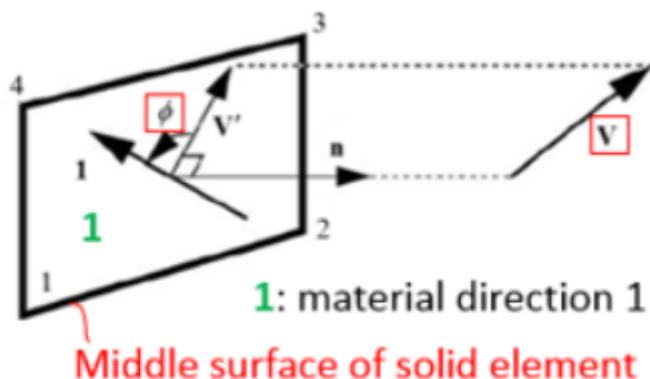


図 256:

- 層の厚さと位置

ソリッド要素の厚さと位置は、要素メッシュにより定義されます。

- 層に用いられる複合材料

- オプション mat_IDj で、各層に異なる材料タイプを使用することが可能
- 複合材料LAW12、LAW14、LAW25をこのプロパティと使用することが可能

- これらの複合材料則を伴う破壊モデル /FAIL/HASHIN、/FAIL/PUCKおよび /FAIL/LAD_DAMAも考慮される
- 対応する/PARTカードで参照される材料は、時間ステップおよびインターフェース剛性の計算のみに使用される
- LAW25については、(ソリッドおよび厚肉シェルに関しては)そのような場合、材料が横方向(材料方向2および3)に弾性であり、E33値を指定する必要があるとみなされます。

追加の情報については、“Composite material and Composite failure”をご参照ください。

See Also

[/DRAPE \(Starter\)](#)

[Property and Elements \(FAQ\)](#)

複合材破壊モデル

Radiossでは、次の複合材破壊モデルを使用して複合材の材料破壊を表現できます。

- /FAIL/HASHIN
- /FAIL/PUCK
- /FAIL/LAD_DAMA
- /FAIL/CHANG

複合材材料は、2種類の材料からなります(マトリックスと補強繊維)。各材料の破壊挙動は異なります。Radiossでは、同一複合材要素内でマトリックスと繊維に異なる破壊モデルを使用できます (TYPE11、TYPE16、TYPE17、TYPE51、PCOMPP、またはTYPE22というプロパティを持つ要素の場合)。たとえば、繊維破壊に/FAIL/HASHIN、マトリックス破壊に/FAIL/PUCK、層またはプライ間の剥離に/FAIL/LAD_DAMAを使用できます(複合材に複数の層またはプライが定義されている場合)。

上記の一般的な複合材破壊モデルに加えて、/FAIL/FLD(ガラスのような、層(プライ)内の等方性脆性複合材材料に使用されます)、/FAIL/ENERGY、/FAIL/TBUTCHER、および/FAIL/TENSSTRAINを使用して、複合材の層(プライ)の破壊を表現することもできます。

/FAIL/HASHIN

HASHIN破壊では、次の2つの主要破壊モードが考慮されます。

- 繊維モード: 引張時の繊維破断または圧縮時の繊維座屈が原因で、複合材が破壊します。したがって、/FAIL/HASHINでは、引張 / せん断繊維モード、圧縮繊維モード、およびクラッシュモードは繊維モードです。方向1が繊維方向である場合、平面23が繊維モードの主な破壊平面となります。
- マトリックスモード: 繊維からのマトリックス亀裂が原因で、複合材が破壊します。破壊マトリックスモード(またはせん断破壊マトリックスモード)と剥離モードはどちらもマトリックスモードです。マトリックスモードの破壊平面は繊維と平行であり、応力 σ_{11} はこのモードでは考慮されません。

16. L. Gornet, "Finite Element Damage Prediction of Composite Structures"

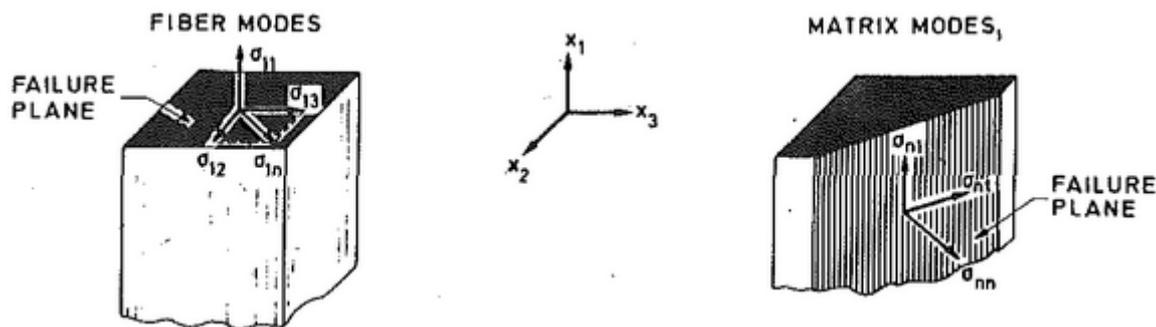


図 257: 一方向薄層モデルの繊維モードとマトリックスモード

一方向薄層モデル¹⁷内の繊維は、1方向のみに沿っており、繊維薄層モデル内の繊維は2方向に沿っています。

	一方向薄層モデル	繊維薄層モデル
損傷基準	<p>$D=1$の場合は、破壊。 $0 \leq D < 1$、Dの場合は、破壊なし。 ここで、$D = \text{Max}(F_1, F_2, F_3, F_4)$</p>	<p>$D=1$の場合は、破壊。 $0 \leq D < 1$、Dの場合は、破壊なし。 ここで、$D = \text{Max}(F_1, F_2, F_3, F_4)$</p>
引張 / せん断繊維モード	$F_1 = \left(\frac{\langle \sigma_{11} \rangle}{\sigma_1^t} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{\sigma_{12}^f} \right)$	$F_1 = \left(\frac{\langle \sigma_{11} \rangle}{\sigma_1^t} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{\sigma_a^f} \right)$ $F_2 = \left(\frac{\langle \sigma_{22} \rangle}{\sigma_2^t} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2}{\sigma_b^f} \right)$ <p>ここで、$\sigma_a^f = \sigma_{12}^f$、$\sigma_b^f = \sigma_{12}^f \frac{\sigma_2^t}{\sigma_1^t}$</p>
圧縮繊維モード	$F_2 = \left(\frac{\langle \sigma_a \rangle}{\sigma_1^c} \right)^2$ <p>ここで、$\sigma_a = -\sigma_{11} + \left\langle -\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2} \right\rangle$</p>	$F_3 = \left(\frac{\langle \sigma_a \rangle}{\sigma_1^c} \right)^2$ <p>ここで、$\sigma_a = -\sigma_{11} + \langle -\sigma_{33} \rangle$</p> $F_4 = \left(\frac{\langle \sigma_b \rangle}{\sigma_2^c} \right)^2$ <p>ここで、$\sigma_b = -\sigma_{22} + \langle -\sigma_{33} \rangle$</p>
クラッシュモード	$F_3 = \left(\frac{\langle p \rangle}{\sigma_c} \right)^2$ <p>ここで、$p = -\frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3}$</p>	$F_5 = \left(\frac{\langle p \rangle}{\sigma_c} \right)^2$ <p>ここで、$p = -\frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3}$</p>

	一方向薄層モデル	繊維薄層モデル
せん断破壊マトリックスモード		$F_6 = \left(\frac{\sigma_{12}}{\sigma_{12}^m}\right)^2$
破壊マトリックスモード	$F_4 = \left(\frac{\langle\sigma_{22}\rangle}{\sigma_2^t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2$ <p>ここで、</p> $S_{12} = \sigma_{12}^m + \langle -\sigma_{22} \rangle \tan\phi$ $S_{23} = \sigma_{23}^m + \langle -\sigma_{22} \rangle \tan\phi$	
剥離モード	$F_5 = S_{del}^2 \left[\left(\frac{\langle\sigma_{33}\rangle}{\sigma_3^t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{\tilde{S}_{23}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2 \right]$ <p>ここで、</p> $S_{13} = \sigma_{13}^m + \langle -\sigma_{33} \rangle \tan\phi$ $\tilde{S}_{23} = \sigma_{23}^m + \langle -\sigma_{33} \rangle \tan\phi$	$F_7 = S_{del}^2 \left[\left(\frac{\langle\sigma_{33}\rangle}{\sigma_3^t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2 \right]$ <p>ここで、</p> $S_{13} = \sigma_{13}^m + \langle -\sigma_{33} \rangle \tan\phi$ $\tilde{S}_{23} = \sigma_{23}^m + \langle -\sigma_{33} \rangle \tan\phi$



注: $\langle a \rangle = \begin{cases} a & \text{if } a > 0 \\ 0 & \text{if } a < 0 \end{cases}$

/FAIL/HASHINでは、材料強度 $\sigma_1^t, \sigma_2^t, \sigma_3^t, \sigma_1^c, \sigma_2^c$ は、複合材の引張 / 圧縮試験から得られます。

破碎強度 σ_c と繊維せん断強度 σ_{12}^f は、準-静的パンチせん断試験(QS-PST)から得ることができます。²² サポートスパン径対パンチ径比率(SPR)からの破碎強度 σ_c は0であり、SPRからの繊維せん断強度 σ_{12}^f は1.1です。

ϕ はクーロン摩擦角です。複合材が(引張ではなく)圧縮も受けている場合は、複合材のせん断強度が高まることが確認されています。その原因は、マトリックスと繊維間の摩擦です。

せん断強度は、圧縮応力に比例すると見なされ、次のように計算されます:

$$S_{12} = \sigma_{12}^m + \langle -\sigma_{22} \rangle \tan\phi \tag{194}$$

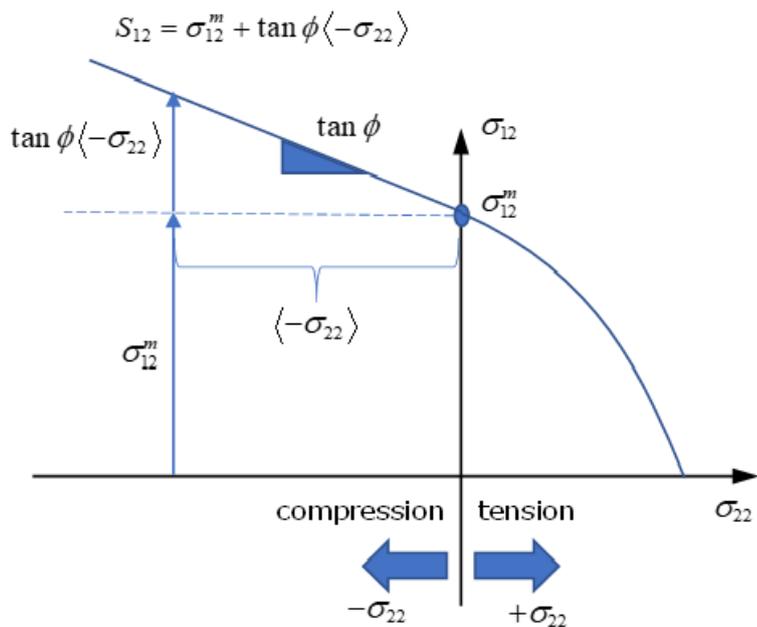


図 258:

摩擦角 ϕ は、軸に対してさまざまな角度 θ (例: 30° , 45° , 60° など)で圧縮試験を行うことでフィッティングできます。

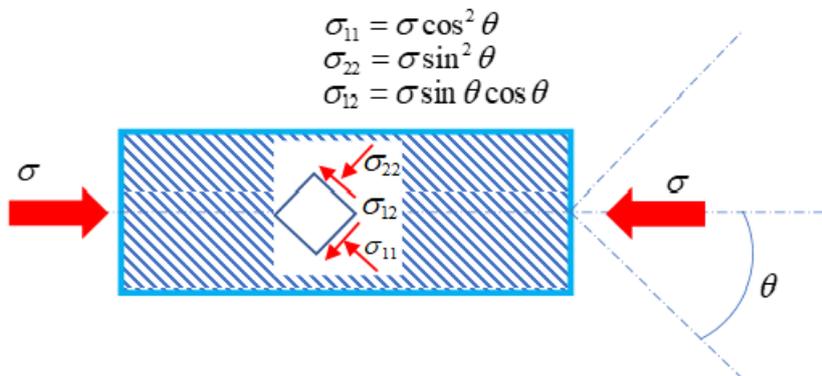


図 259:

σ_{12}^m , σ_{13}^m , σ_{23}^m は、3方向のマトリックスせん断試験から得ることができます。

S_{del} は、剥離基準のスケールファクターです。これは、実験で剥離破壊を損傷領域と相関付けるための複合材剥離実験データによってフィッティングできます。

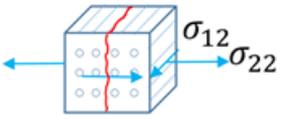
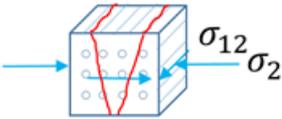
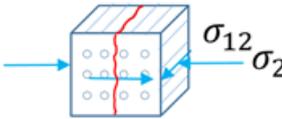
/FAIL/PUCK

Puck破壊では、次の2タイプの破壊が考慮されます。

- 繊維破壊：繊維が引張強度または圧縮強度の限界に達することにより、複合材が破壊します。
- 繊維間破壊 (IFF)：繊維マトリックスの亀裂が原因で、複合材が破壊します。

損傷基準

$D=1$ の場合は、破壊。

	<p>$0 \leq D < 1$の場合は、破壊なし。</p> <p>ここで、</p> $D = \text{Max}(e_f(\text{tensile}), e_f(\text{compression}), e_f(\text{ModeA}), e_f(\text{ModeB}), e_f(\text{ModeC}))$
繊維部破壊	<p>引張繊維破壊モード: $\sigma_{11} > 0$</p> $e_f(\text{tensile}) = \frac{\sigma_{11}}{\sigma_1^t}$
	<p>圧縮繊維破壊モード: $\sigma_{11} < 0$</p> $e_f(\text{compression}) = \frac{ \sigma_{11} }{\sigma_1^c}$
繊維間破壊 (IFF) ¹⁸	<p>モードA ($\sigma_{22} > 0$の場合):</p>  <p>図 260:</p> $e_f(\text{ModeA}) = \frac{1}{\bar{\sigma}_{12}} \left[\sqrt{\left(\frac{\bar{\sigma}_{12}}{\sigma_2^t} - p_{12}^+ \right)^2 \sigma_{22}^2 + \sigma_{12}^2} + p_{12}^+ \sigma_{22} \right]$
	<p>モードC ($\sigma_{22} < 0$の場合):</p>  <p>図 261:</p> $e_f(\text{ModeC}) = \left[\left(\frac{\sigma_{12}}{2(1+p_{22}^-)\bar{\sigma}_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{22}}{\sigma_2^c} \right)^2 \right] \left(\frac{\sigma_2^c}{-\sigma_{22}} \right)$
	<p>モードB:</p>  <p>図 262:</p> $e_f(\text{ModeB}) = \frac{1}{\bar{\sigma}_{12}} \left(\sqrt{\sigma_{12}^2 + (p_{12}^- \sigma_{22})^2} + p_{12}^- \sigma_{22} \right)$

繊維間破壊では、モードAは横繊維方向（繊維方向に対して直角）の引張がかかった状態の破壊を示し、この場合、せん断荷重によって破壊限界が引き下げられる可能性があります。

横繊維方向の圧縮がかかっている場合、最初は圧縮が増大すると、複合材のせん断荷重も増大します（モードB）。圧縮が増大し続けると、せん断荷重は減少に転じます（モードC）。

入力パラメータ

繊維破断破壊の場合、繊維強度 σ_1^t , σ_1^c は、繊維方向の引張および圧縮の複合材試験から得られます。

繊維間破壊の場合、強度 σ_2^t , σ_2^c は、横繊維方向の引張および圧縮の複合材試験から得られます。

せん断強度 $\bar{\sigma}_{12}$ は、純せん断試験($\sigma_2 = \sigma_1 = 0$)によって得られます。

σ_2^t , σ_2^c , $\bar{\sigma}_{12}$ を使用して、モードBとモードCの p_{22}^- と p_{12}^- が求まります。

σ_2^t , $\bar{\sigma}_{12}$ と、横繊維方向の追加の引張-せん断試験により、 p_{12}^+ が求まります。横繊維方向の追加の引張-せん断試験では、等しい引張-せん断($\sigma_{22} = \sigma_{12}$ による)荷重を使用できます。

これで、下記のように $\sigma_{22} - \sigma_{12}$ 平面内の破壊曲線を得ることができます。

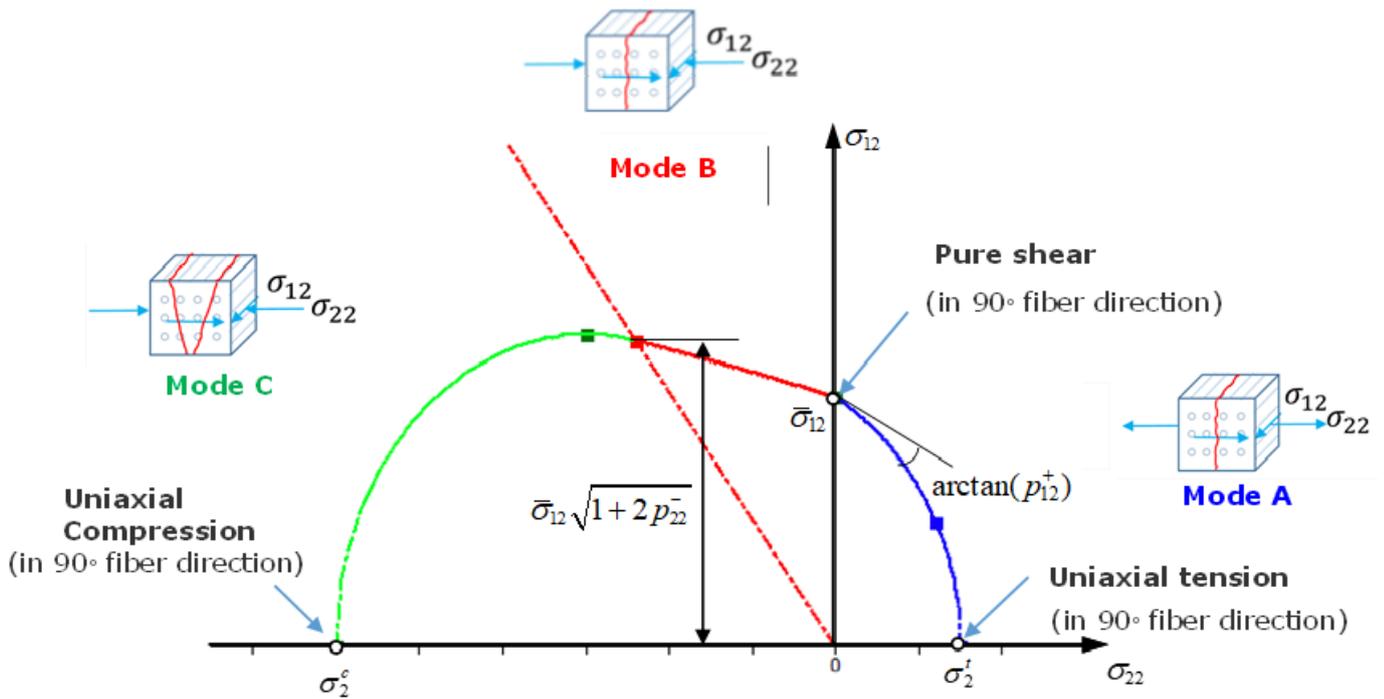


図 263: $\sigma_{22} - \sigma_{12}$ 平面内のIFF破壊曲線

p_{12}^+ , p_{12}^- , p_{22}^- パラメータについて¹⁹。カーボンファイバー複合材の場合は $p_{12}^+ = 0.35$, $p_{12}^- = 0.3$, $p_{22}^- = 0.2$ を使用し、グラスファイバー複合材の場合は $p_{12}^+ = 0.3$, $p_{12}^- = 0.25$, $p_{22}^- = 0.2$ を使用します。

/FAIL/LAD_DAMA

/FAIL/LAD_DAMAを使用して、複合材層間の剥離を表現します（マトリックス内の損傷の伝播）。仮想インターフェース（接触）を介して層同士が結合されていると想定します。

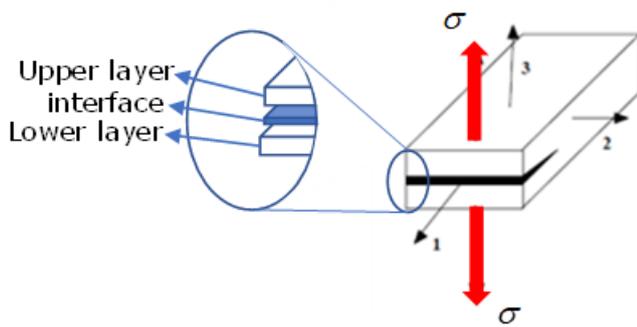


図 264:

たとえば、下記のように複合材に荷重がかかっている場合、引張 σ と方向3の変位 δ は次の曲線で示されているとおりです。

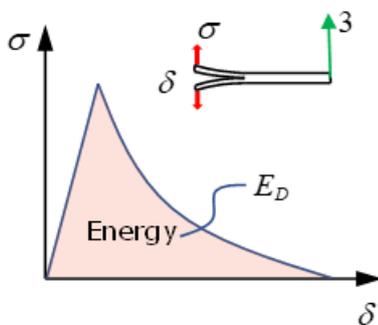


図 265:

引張と変位の関係を示す曲線の下面積は、剥離による吸収エネルギーを表します。これは、損傷インターフェースのひずみエネルギーとも呼ばれます。このひずみエネルギーによる破壊を以下に示します。ここでは3つの剥離モードが考慮されています:

$$E_D = \frac{1}{2} \left[\frac{\langle \sigma_{33} \rangle^2}{K_3(1-d_3)} + \frac{\langle -\sigma_{33} \rangle^2}{K_3} + \frac{\sigma_{32}^2}{K_2(1-d_2)} + \frac{\sigma_{31}^2}{K_1(1-d_1)} \right] \quad (195)$$

ここで、 σ_{33} 、 σ_{32} 、 σ_{31} は、以下の3つの剥離挙動モードにおける応力です。

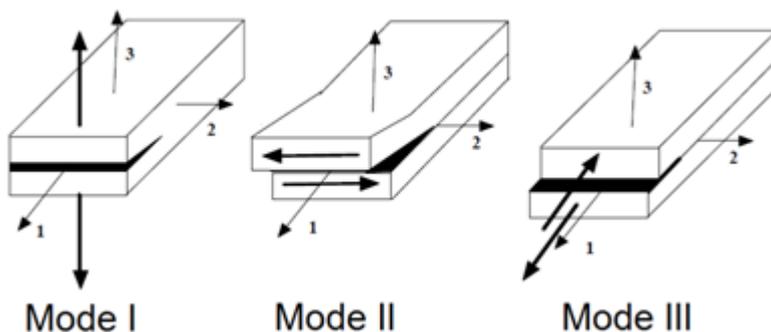


図 266:

剥離のひずみエネルギー E_D により、これらの3モードについて、損傷エネルギー解放率とも呼ばれる熱力学的な力(仮想インターフェースの接触力)を計算できます:

- モデルI(DCB試験体²¹)

$$Y_{d_3} = \left. \frac{\partial E_D}{\partial d_3} \right|_{\sigma=cst} = \frac{1}{2} \frac{\langle \sigma_{33} \rangle^2}{K_3(1-d_3)^2}$$

- モデルII(ENF試験体²¹)

$$Y_{d_2} = \left. \frac{\partial E_D}{\partial d_2} \right|_{\sigma=cst} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{32}^2}{K_2(1-d_2)^2}$$

- モデルIII

$$Y_{d_1} = \left. \frac{\partial E_D}{\partial d_1} \right|_{\sigma=cst} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{31}^2}{K_1(1-d_1)^2}$$

ここで、 K_3 、 K_2 、 K_1 は、仮想インターフェースの剛性(層間剛性とも呼ばれます)です。これらの値は次のように計算できます:

$$K_3 = \frac{2E_{33}}{t} \tag{196}$$

$$K_2 = \frac{2G_{23}}{t}$$

$$K_1 = \frac{2G_{13}}{t}$$

ここで、

t 仮想インターフェースの板厚。これは、層厚の5分の1と想定できます。

G_{13} 、 G_{23} 、 E_{33} 上層または下層から。

d_i 損傷変数($i=1,2,3$)。

この値の範囲は0~1です。この値は、複合材が Y_0 に達すると累積し始めます。

モードIの例で、方向3での引張時において、最初、 d_3 は、熱力学的な力 Y_{d_3} が Y_0 に達するまで常に0のままになります(左の図)。

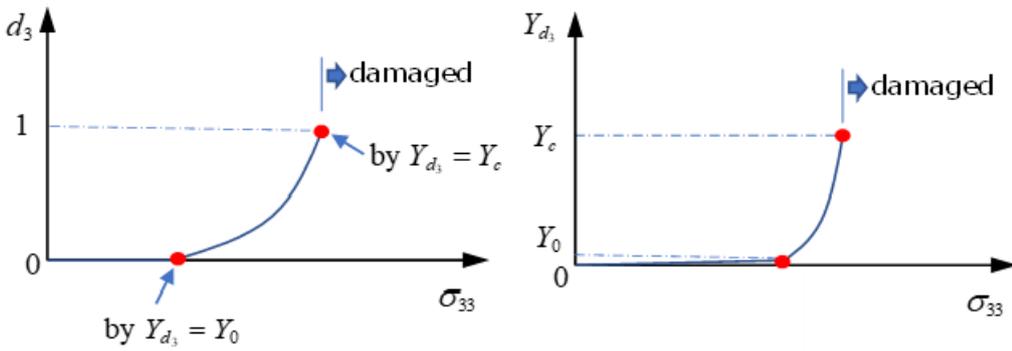


図 267:

Y_0 に達すると、損傷変数は増加し始め、1に達すると、 $d_3 = 1$ となります(この時点の熱力学的な力 Y_{d_3} は臨界損傷 Y_c になります)。複合材は完全に剥離したと見なすことができ、複合材を直ちに削除するか、応力を小さくすることができます。Radiossでは、オプション τ_{\max} を使用して指数関数的な応力減少をシミュレートし、 Y_c における応力は $\sigma_d(t_r)$ となります(損傷時の応力減少)。

熱力学的な力 Y_{d_i} と d_i との関係は次のとおりです:

- $d \geq 1$ の場合、 $d = 1$
- $d < 1$ の場合、 d は Y の関数(損傷評価則):

$$d = w(Y) = \frac{\langle \sqrt{Y} - \sqrt{Y_0} \rangle}{\sqrt{Y_c} - \sqrt{Y_0}} \tag{197}$$

$$Y = Y_{d_3} + \gamma_1 Y_{d_1} + \gamma_2 Y_{d_2} \quad \text{ここで、} \quad Y_{d_i} = \sup_{t \leq t} Y_{d_i}$$

ここで、 γ_1, γ_2 は他の2つの剥離モードを考慮するためのスケールファクターです。これは実験によって検証できます(DCBとENFの試験体試験²¹)。

モードIの例では、これは方向3における純粋剥離であるため、 γ_1, γ_2 は0にすることができ、 $Y = Y_{d_3}$ となります。 Y_{d_3} と d_3 の関係は次のようになります:

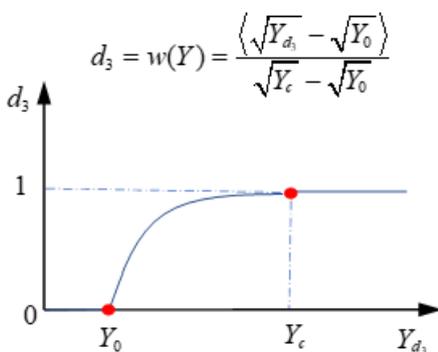


図 268:

損傷変数はどれだけの速度で増加するのでしょうか？ 損傷速度 \dot{d} (損傷評価則とも呼ばれます)は次のように計算されます:

- $d = 1$ であれば、 $\dot{d} = const.$
- $d < 1$ であれば、 $\dot{d} = \frac{k}{a}[1 - \exp(-a(w(Y) - d))]$

$\frac{k}{a}$ は最大損傷率で、破壊現象の最小継続時間を意味します。この逆数 $\frac{a}{k}$ は特性時間と呼ばれ、1次元の引張試験によって得ることができます。²³

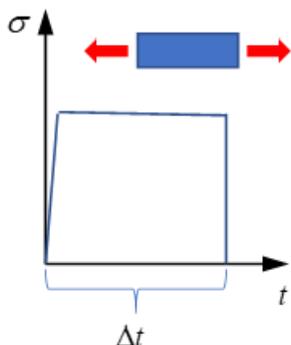


図 269:

複合材損傷の最小時間 Δt を求めるための異なる応力による引張サンプルから、 $\sigma - \Delta t$ 曲線は、特性時間 $\frac{a}{k}$ に対応する垂直漸近線となります。

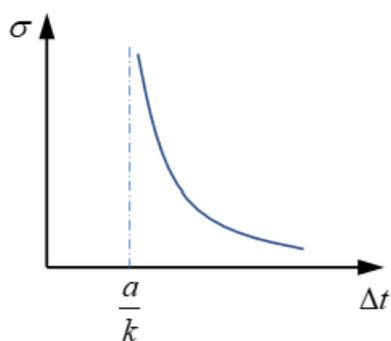


図 270:

パラメータ a および k によって損傷評価則が決定されます。たとえば、定数パラメータ a (ここでは $a = 1$)を使用した場合、 k の値が小さくなるほど、複合材破壊の脆性は高くなります。

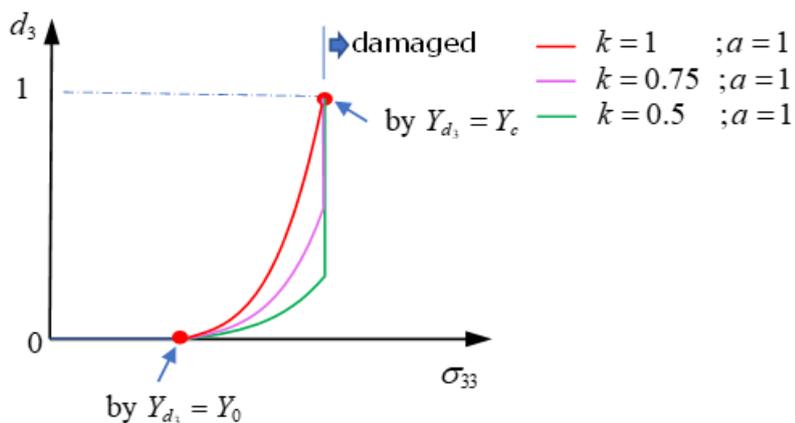


図 271:

定数パラメータ k (ここでは $k = 1$)を使用した場合、 a の値が大きくなるほど、複合材破壊の脆性は高くなります。

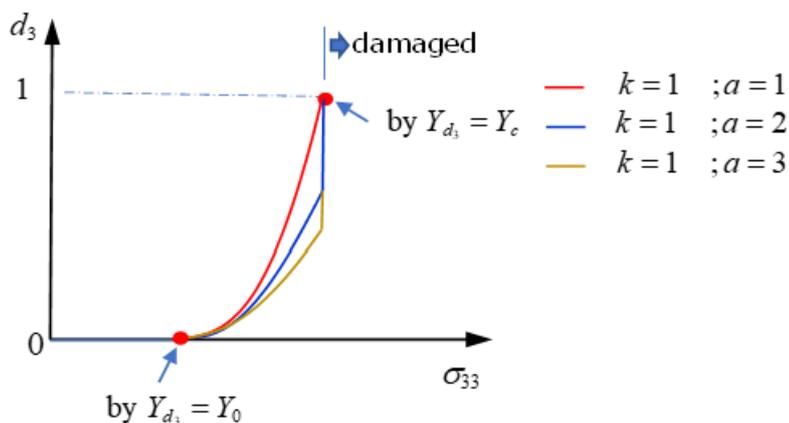


図 272:

/FAIL/CHANG

Chang-Chang破壊では、次の2つの主要破壊モードが考慮されます。

- 繊維モード：引張時の繊維破断または圧縮時の繊維座屈が原因で、複合材が破壊します。
- マトリックスモード：引張時または圧縮時のマトリックス破壊が原因で、複合材が破壊します。

この破壊基準はシェル要素専用です。

損傷基準		$D = 1$ の場合は、破壊。 $0 \leq D < 1$ の場合は、破壊なし。 ここで、 $D = \text{Max}(e_{f2}, e_{c2}, e_{m2}, e_{d2})$ 。
繊維破損	引張繊維モード $\sigma_{11} > 0$	$e_{f2} = \left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_1^t} \right)^2 + \beta \left(\frac{\sigma_{12}}{\sigma_{12}^t} \right)^2$

	圧縮繊維モード $\sigma_{11} < 0$	$e_{c2} = \left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_1^c}\right)^2$
マトリックス亀裂	引張マトリックスモード $\sigma_{22} > 0$	$e_{m2} = \left(\frac{\sigma_{22}}{\sigma_2^t}\right)^2 + \beta \left(\frac{\sigma_{12}}{\bar{\sigma}_{12}}\right)^2$
	圧縮マトリックスモード $\sigma_{22} < 0$	$e_{d2} = \left(\frac{\sigma_{22}}{2\bar{\sigma}_{12}}\right)^2 + \left[\left(\frac{\sigma_2^c}{2\bar{\sigma}_{12}}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{22}}{\sigma_2^c} + \left(\frac{\sigma_{12}}{\bar{\sigma}_{12}}\right)^2$

ここで、

方向1

繊維方向。

σ_1^t, σ_1^c

繊維の引張 / 圧縮強度。

σ_2^t, σ_2^c

マトリックス強度。

方向2(方向1に対して垂直)の引張荷重または圧縮荷重。

$\bar{\sigma}_{12}$

複合材プライ平面のせん断強度。

β

せん断スケールファクター(実験によって特定できます)。

損傷時の応力減少

損傷基準に達した後:

- HASHIN:

$$D = \text{Max}(F_1, F_2, F_3, F_4) \geq 1$$

- PUCK:

$$D = \text{Max}(e_f(\text{tensile}), e_f(\text{compression}), e_f(\text{ModeA}), e_f(\text{ModeB}), e_f(\text{ModeC})) \geq 1$$

- LAD_DAMA:

$$d \geq 1$$

- CHANG:

$$D = \text{Max}(e_{f2}, e_{c2}, e_{m2}, e_{d2}) \geq 1$$

応力が減少し始め、指数関数を使用することで徐々に減少して、数値的不安定が回避されます。

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= \sigma_d(t_r) \cdot f(t) \\ &= \sigma_d(t_r) \cdot \exp\left(-\frac{t-t_r}{\tau_{\max}}\right) \end{aligned} \tag{198}$$

ここで、 $t \geq t_r$

τ_{\max} オプションは、損傷時に応力がどれだけ緩やかに減少するかを制御します。

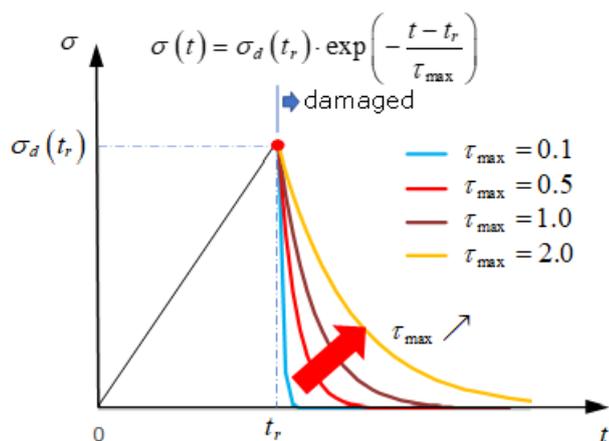


図 273:

ここで、

$\sigma_d(t_r)$

損傷が $D \geq 1$ に達したときの応力成分。

t_r

$\sigma_d(t_r)$ の時間。

τ_{\max}

動的緩和の時間。

τ_{\max} の値が大きいほど、損傷時の応力減少が緩やかになります。通常、これには10~20時間ステップを要します。

参考文献

17. Hashin, Z., "Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites," Journal of Applied Mechanics, Vol. 47, 1980, pp. 329-334.
18. A. Puck, J. Kopp, and M. Knops., "Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models". Composites Science Technology, 62. pp. 1633-1662. 2002.
19. A. Puck, J. Kopp, and M. Knops. "Guidelines for the determination of the parameters in Puck's action plane strength criterion". Composites Science Technology 62. pp. 371-378. 2002.
20. L. Gornet, "Finite Element Damage Prediction of Composite Structures".
21. Ladevèze, P., Allix, O., Douchin, B., Lévêque, D., "A Computational Method for damage Intensity Prediction in a Laminated Composite Structure", Computational mechanics—New Trends and Applications In: Idelsohn, S., Oñate E., and Dvorkin E., (eds.) CIMNE, Barcelona, Spain (1998).
22. Gama B.A., Gillespie J.W., Punch Shear Behavior of Composites at Low and High Rates[M]// Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures. Springer Netherlands, 2006.
23. Allix, O. & Deü, Jean-François. (1997). Delay-damage modeling for fracture prediction of laminated composites under dynamic loading. Engineering Transactions. 45. 29-46.

結合

スポット溶接(ボルトまたは接着結合)

スポット溶接のモデル化には、以下の3つの方法があります:

- 節点結合
- スプリング(/PROP/TYP13)結合
- ソリッド結合

スプリング(/PROP/TYP13)結合とソリッド結合は、ボルトまたは接着結合をモデル化することもできます。

節点結合

1つのインターフェースタイプ2で最初のサーフェスをメイン側として2番目のサーフェスのある節点をセカンダリ節点とする方法: この方法では、メインサーフェスのメッシュがスポット溶接位置から独立させることができます。メインサーフェスでのアウグラスの問題は無くなります。2番目のシェルで、サーフェスマッシュがスポット溶接位置とアウグラスを考慮しなければならない問題は残ります。このモデル化アプローチの主な問題は、結合の非変形性とその無限の強度となります。

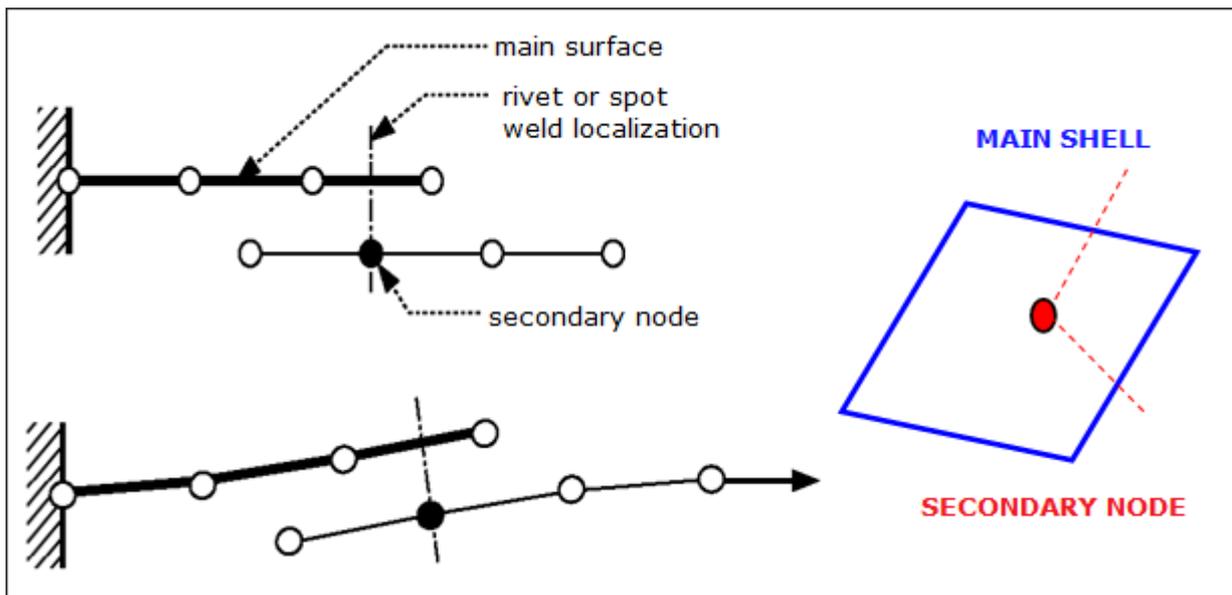


図 274: 2つのシェルサーフェス間の結合の例

スプリング(/PROP/TYP13)結合

2つのタイドインターフェースとスプリングを用いる方法: 2つのタイドインターフェースの利用は完全に対称な方法で、2つのサーフェスのメッシュは自由になり、アウグラスを回避することもできます。スポット溶接はビームタイプスプリング要素を用いてモデル化されます。スプリング要素は、シェル要素に直接結合されていない独立節点を用います。2つの節点のうち1つは最初のサーフェス上(または近く、正確にシェルの上(距離0)に位置する必要はありません)に配置し、2番目の節点は2番目のサーフェス上に配置します。1つのタイドインターフェースが1つのスプリング節点と最初のサーフェスに結合します。同様に、2番目のタイドインターフェースは2番目のサーフェスの2番目の節点に結合します。

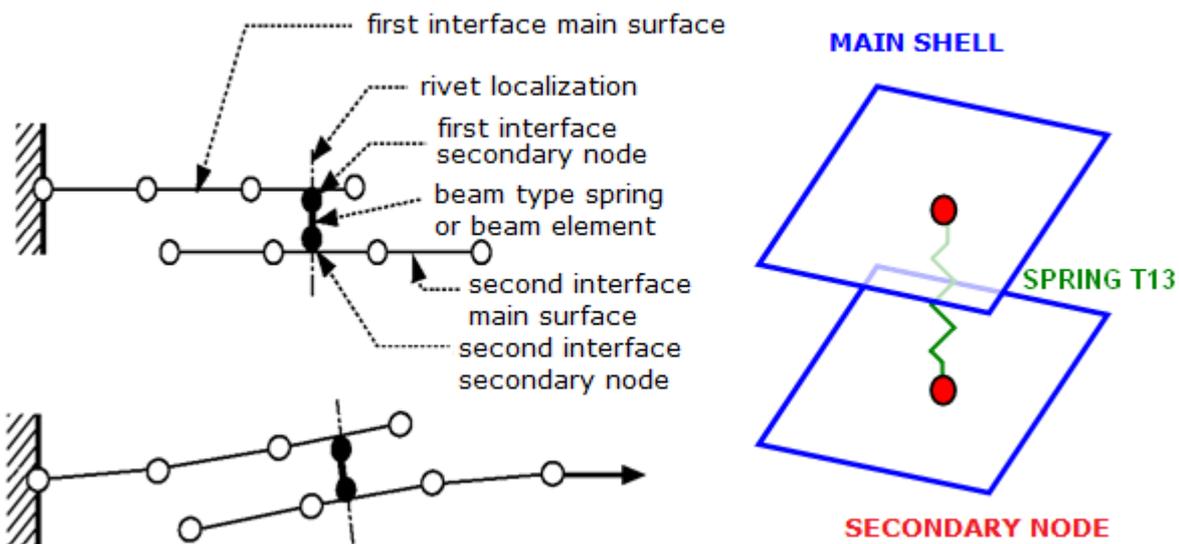


図 275: スポット溶接のモデリング

この方法を用いたスポット溶接の生成は、別の適切な手法で、このアプローチでは結合位置はシェルのメッシュから独立させることができます。スプリングTYPE13の場合、スポット溶接プロパティを直接入力するため、上記の節点結合モデルより精度は高くなります。

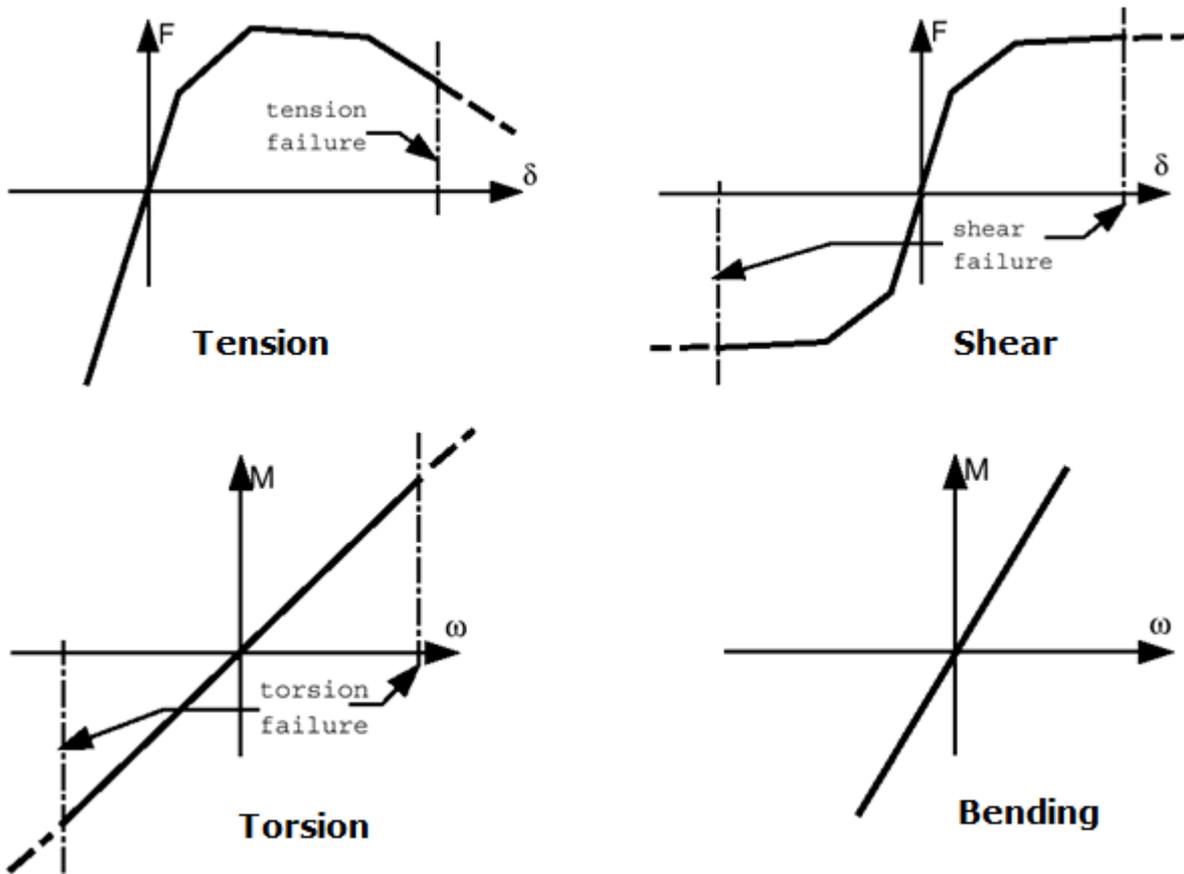


図 276: スプリングタイプ13 - スポット溶接のための典型的な入力

加えて、スポット溶接の破断をモデル化する2つの方法があります:

1. スプリングタイプ13で使用可能な破壊基準を使用。詳細については、[/PROP/TYPE13 \(SPR_BEAM\)](#)の破壊基準のコメントを参照のこと。
2. タイドコンタクト(タイド接触([/INTER/TYPE2](#)))の $Spot_{flag}FLAG= 20, 21$ または 22 を使用。

 注: スポット溶接のためのスプリングTYPE13を使ったモデル化テクニックは、溶接線、ヘム、接着、ボルトといった他の種類の結合にも用いることができます。ボルトのモデル化ではタイドインターフェースの利用は必要ではなく、シェルの節点を直接剛体に入れて結合することができます。

ソリッドスポット溶接

8節点の3次元ソリッド要素(/PROP/TYPE43を使用)と/MAT/LAW59+/FAIL/CONNECT(または/MAT/LAW83+/FAIL/SNCONNECT)を使用して、ソリッドスポット溶接をモデリングすると、より正確な結果が得られる場合があります。

ソリッド要素とプロパティ

3次元ソリッド要素は/PROP/TYPE43を使用し、平面(1、2、3、4)と平面(5、6、7、8)の間のせん断面上に4つの積分点を有しています。法線方向 t に1つの積分点があります。この要素タイプには時間ステップ自体はなく、その安定性は節点結合で保証されます。したがって、スポット溶接は非常に薄くてもかまいません。この特性は接着のモデリングに非常に便利です。

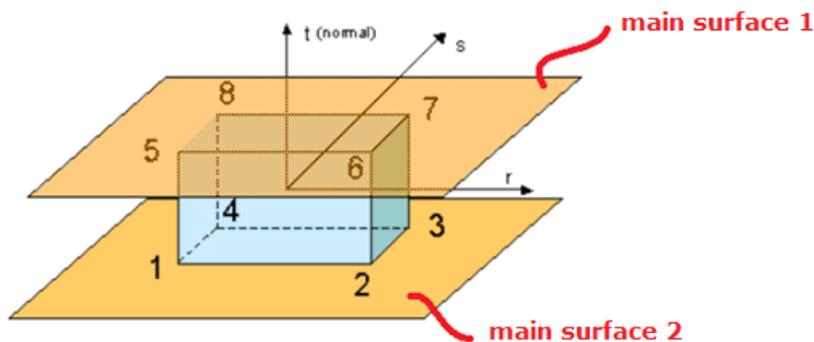


図 278:

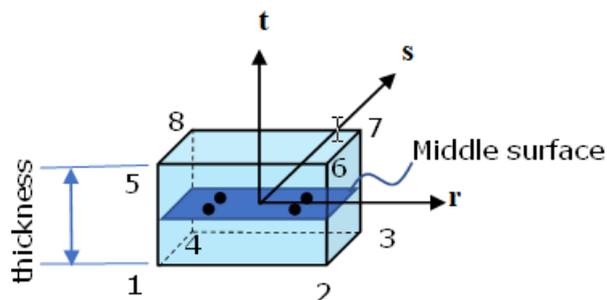


図 279:

シェルシートへの結合

INTER/TYPE2は、ソリッドスポット溶接と上下2つのメインサーフェスを結合するために使用できます。1つのシェルに結合された平面(1、2、3、4)の節点と、もう1つのシェルに結合された平面(5、6、7、8)の節点です。シェルに結合された他の平面(平面(1、4、8、5)など)を設けることは許可されません。

材料と破壊モデル

Radiossのソリッドスポット溶接は、/MAT/LAW59+/FAIL/CONNECT(または/MAT/LAW83+/FAIL/SNCONNECT)を使用してモデリングできます。この材料モデルは、スポット溶接試験の4つの荷重ケースによって検証される必要があります。

- せん断試験(荷重とスポット溶接上部サーフェスの角度は0度です)
- 法線引張試験(90度試験)
- せん断と法線の組み合わせ試験(30度試験、45度試験、90度試験など)
- モーメント試験(剥離試験)

ヤング率

スポット溶接の剛性は、試験ごとに異なります。法線試験では、上下のシートが変形するため、これはせん断試験の場合より小さくなります。したがって、測定される剛性は通常、せん断試験の真応力と変位の曲線から得られます。

/MAT/LAW59+/FAIL/CONNECT

- 材料降伏曲線:

LAW59では、法線方向とせん断方向のスポット溶接材料降伏曲線が要求されます。法線方向の降伏曲線 ($Y_fct_ID_N$)は、法線引張試験(90度試験)によって特定でき、せん断方向の降伏曲線 ($Y_fct_ID_T$)は、せん断試験(0度試験)によって特定できます。

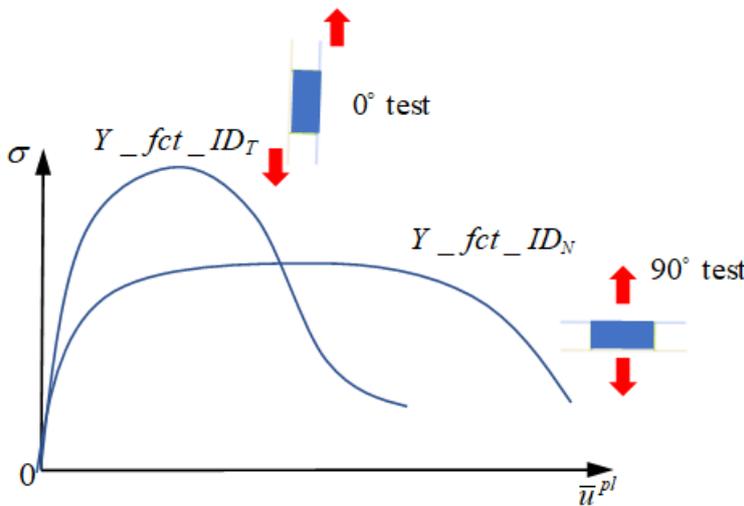


図 280:

この場合、最大応力も曲線内に表されます。入力降伏曲線の参照変位速度 SR_{ref} が与えられた場合、Radiossでは、この参照変位速度に関して変位速度効果が考慮されます。

- スポット溶接破壊:

ソリッドスポット溶接の損傷と破壊は、/FAIL/CONNECTで考慮できます。変位基準やエネルギー基準を使用してスポット溶接の破壊を表すことができます。

- 変位基準の場合、次の2つの代替挙動タイプにより法線変位またはせん断変位に達すると、破壊が生じます:
 - 非連成破壊 ($I_{fail}FAIL=0$: 一方向破壊)

$$\bar{u}_i \cdot f(\bar{u}) > \bar{u}_{maxi} \tag{200}$$

ここで、法線方向については $i = 33$ 、接線方向については $i = 13$ または 23 です。

法線引張試験(90度試験)では、ユーザー定義の最大変位 \bar{u}_{maxN} に達すると、要素が破断します。

せん断引張試験(0度試験)では、ユーザー定義の最大変位 \bar{u}_{maxT} に達すると、要素が破断します。

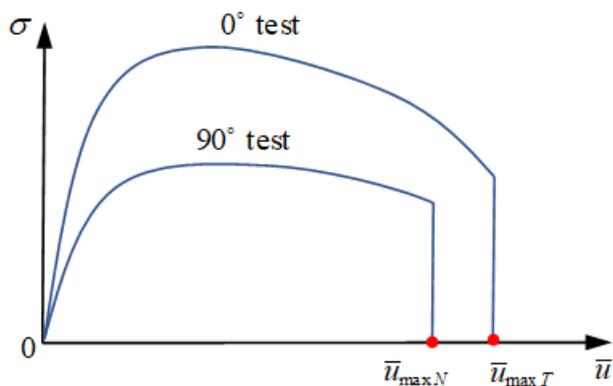


図 281:

モード組み合わせ試験(30度試験や60度試験など)では、ソリッドスポット溶接の破壊では、せん断と法線の組み合わせ応力の効果は考慮されません。各方向の破壊は別々に考慮されます。これら2つの応力のどちらかが対応する最大変位に達すると、要素が破断します。組み合わせ応力を考慮するには、代わりに $I_{fail}FAIL=1$ と設定すると考慮されるようになります。

- ・ 連成破壊 ($I_{fail}FAIL=1$: 多方向破壊)

$$\left| \frac{\bar{u}_N}{\bar{u}_{maxN}} \cdot \alpha_N \cdot f_N(\bar{u}_N) \right|^{\exp_N} + \left| \frac{\bar{u}_T}{\bar{u}_{maxT}} \cdot \alpha_T \cdot f_T(\bar{u}_T) \right|^{\exp_T} > 1 \quad (201)$$

$I_{fail}FAIL=1$ の場合、モード組み合わせ試験では、最大応力 \bar{u}_{maxN} や \bar{u}_{maxT} に達する前に要素が破断します(現実により近い)。曲線破壊サーフェスを表すには、パラメータ α_N , α_T , \exp_N , \exp_T をフィッティングするために、少なくとも4種類の組み合わせ試験が必要です。

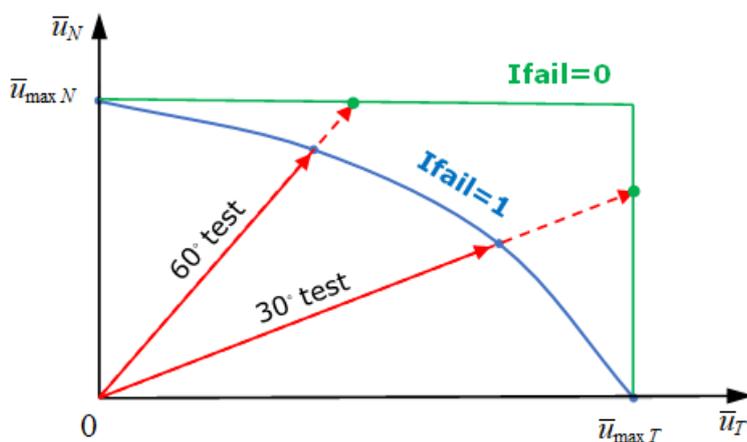


図 282: 破壊サーフェス

- ・ エネルギー基準の場合、最大内部エネルギー EN_{max} , ET_{max} に応じて、法線方向またはせん断方向の内部エネルギーに達すると、破壊が生じます。

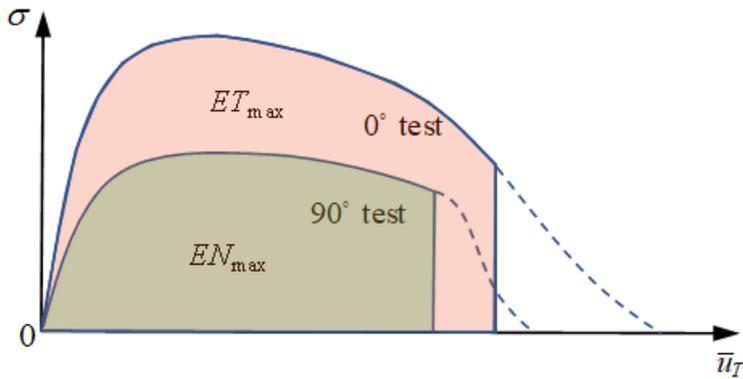


図 283:

モード組み合わせ試験では、内部エネルギーに対する多方向の影響に関する要素の破壊も考慮されます。法線方向とせん断方向の内部エネルギーが入力された場合、次の条件が満たされると、要素は破断します:

$$\left(\frac{E_n}{EN_{\max}}\right)^{N_n} + \left(\frac{E_t}{ET_{\max}}\right)^{N_t} \geq 1 \quad (202)$$

内部エネルギーの合計 EI_{\max} のみを入力する場合、次の条件が満たされると、要素は破断します:

$$\frac{E(t)}{EI_{\max}} \geq 1 \quad (203)$$

EI_{\max} と EN_{\max} , ET_{\max} の両方が入力された場合、これら2つの基準のどちらかに先に達した時点で、要素が破断します。

変位基準とエネルギー基準の両方を定義できます。どちらかの基準に先に達した時点で、要素が破断します。要素が削除されるのは、1つの積分点が破壊基準に達したとき ($I_{\text{solid}} \text{SOLID}=1$ の場合)、またはすべての積分点が破壊基準に達したとき ($I_{\text{solid}} \text{SOLID}=2$ の場合) です。

- スポット溶接の軟化:

破壊基準(変位基準またはエネルギー基準)に達した後、応力は一気に0に低減されるか、パラメータ T_{\max} と N_{soft} を使用して次の式で徐々に減少させることができます:

$$\sigma = \sigma_f \left(1 - \frac{D}{T_{\max}}\right)^{N_{\text{soft}}} \quad (204)$$

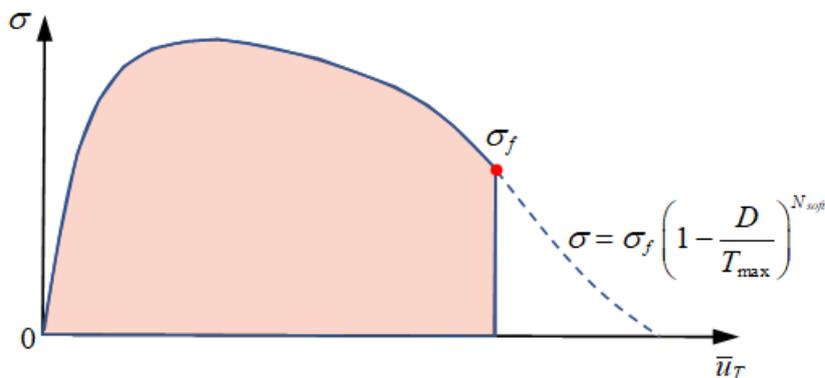


図 284:

図 285 は、さまざまな T_{max} および N_{soft} で、応力低下の挙動がどのように影響を受けるのかを示しています。

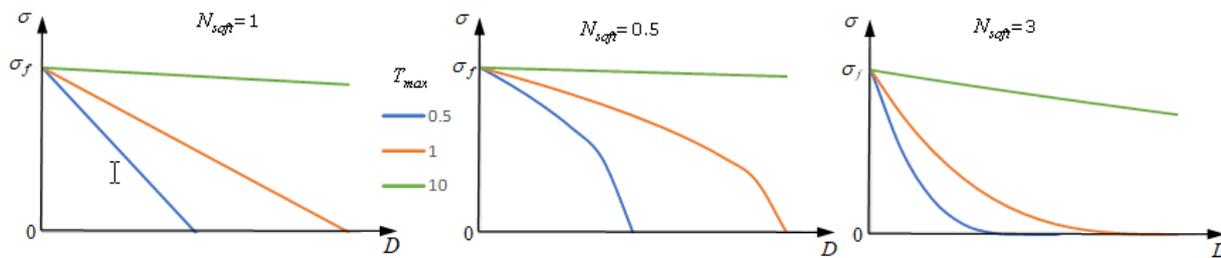


図 285:

/MAT/LAW83+/FAIL/SNCONNECT

• 材料降伏曲線:

LAW83では、 fct_ID_1 を使用してスポット溶接材料曲線を入力できます。LAW59の入力では、法線方向とせん断方向の2つの降伏曲線が必要であるのに対して、LAW83では1つの曲線のみが使用されます。この曲線では、せん断試験から降伏曲線を取得する必要があります。さらに、LAW83の降伏曲線 fct_ID_1 は、真応力と塑性変位の関係として定義されていませんが(LAW59ではこのように定義されています)、正規化された応力と塑性変位の曲線である必要があります。LAW83では、降伏応力は、パラメータ R_N , R_S として入力される最大応力で正規化されます。

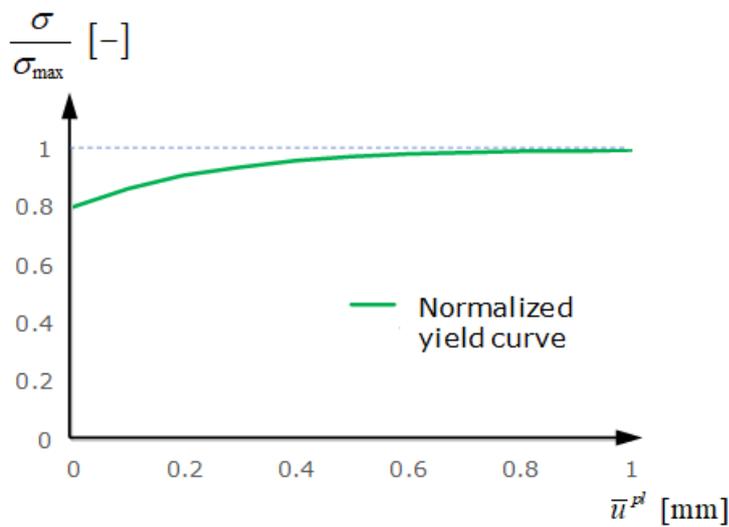


図 286:

スポット溶接の法線応力とせん断応力のさまざまな組み合わせにより、降伏曲線は異なります。これは、LAW83ではパラメータ β を使用して表現できます(これはLAW59では考慮されません)。LAW83で正規化された降伏応力は次のとおりです:

$$\sigma_y = \left[\left(\frac{\sigma_n}{R_N \cdot f_N (1 - \alpha \cdot \text{sym})} \right)^\beta + \left(\frac{\sigma_s}{R_S \cdot f_S} \right)^{\beta \cdot \frac{1}{\beta}} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (205)$$

モーメントの影響が考慮されない場合、LAW83で正規化された降伏応力は次のとおりです:

$$\sigma_y = \left[\left(\frac{\sigma_n}{R_N \cdot f_N} \right)^\beta + \left(\frac{\sigma_s}{R_S \cdot f_S} \right)^{\beta \cdot \frac{1}{\beta}} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (206)$$

図 287 は、組み合わせ試験における正規化された最大応力が、LAW83とLAW59でどのように違うのかを示しています。

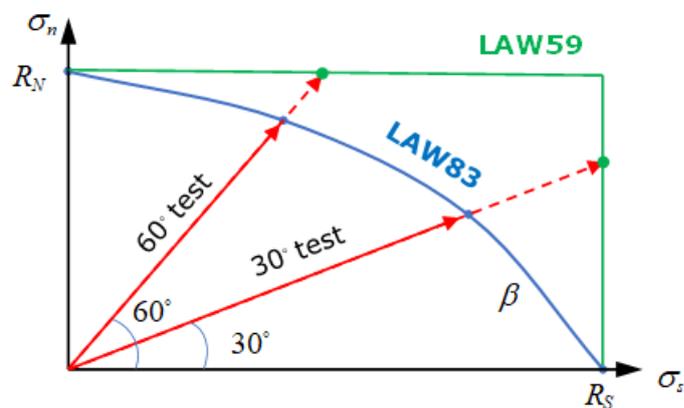


図 287:

図 288 は、 β 値の違いに応じて、LAW83を使用した組み合わせ試験で正規化された最大応力がどのように変化するのかが示されています。

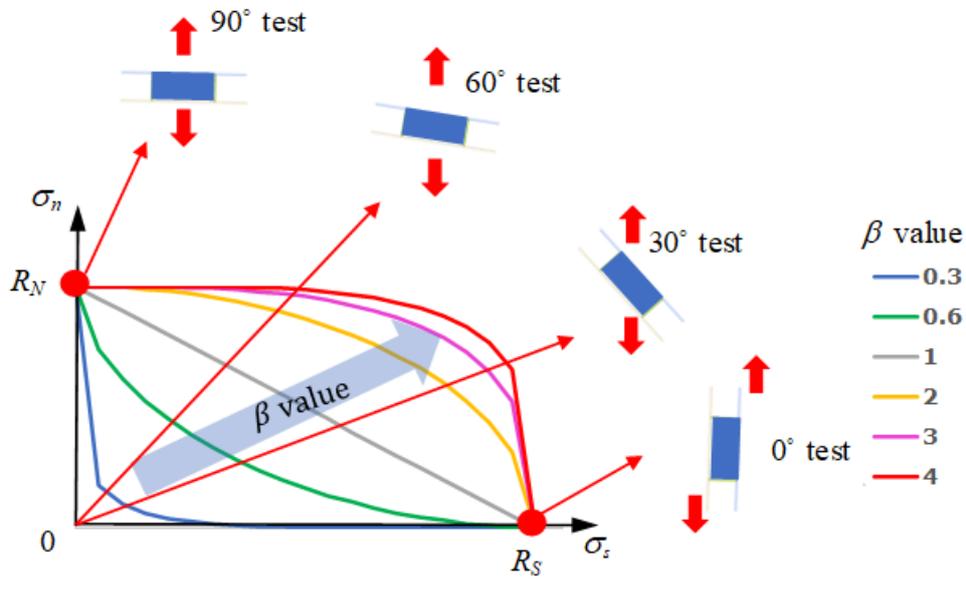


図 288:

パラメータ α を使用して、スポット溶接でのモーメントの影響を表します。

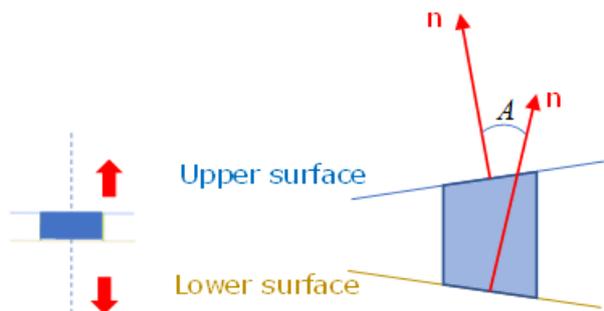


図 289: 非中心引張試験(剥離試験)

$\alpha \cdot \text{sym}$ を使用して、剥離試験の最大応力を低減させます。sym は、スポット溶接の上下サーフェス間の角度の正弦です。この値は、スポット溶接の変形時に、 $[-1, 1]$ という範囲内で変化します。 α パラメータは、実際の実験データに一致させるためにシンプルなFEMモデルを使用してフィッティングできます。²⁴

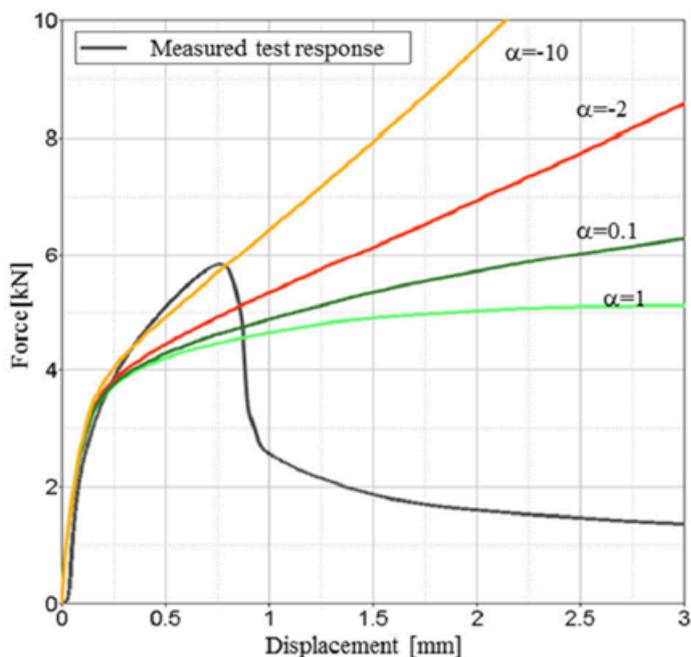


図 290: 剥離試験で α 値の違いが力と変位の関係に及ぼす影響

曲線入力 fct_ID_N および fct_ID_5 を使用して、変位速度が材料の降伏曲線に及ぼす影響を考慮することもできます。

- 材料の損傷と破壊:

スポット溶接破壊には、`/FAIL/SNCONNECT` を使用できます。この破壊モデルでは、損傷開始と破壊の塑性変位(法線方向とせん断方向)が必要です。

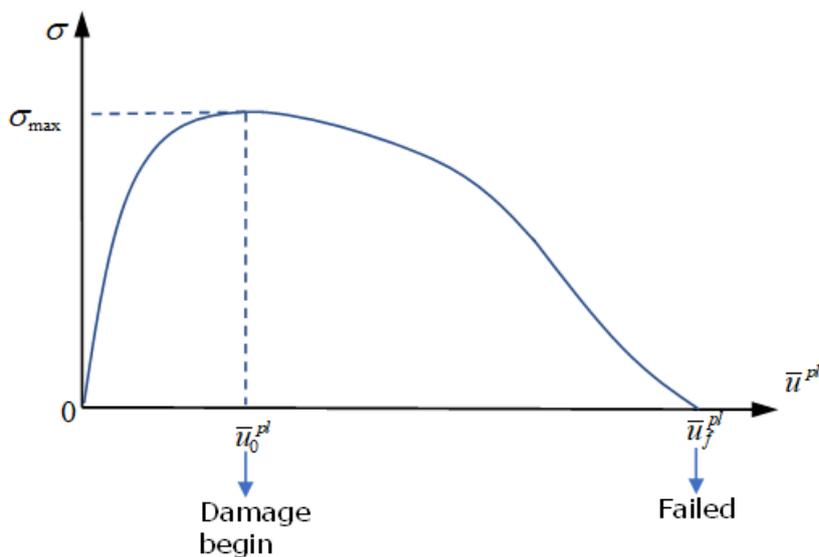


図 291:

モード組み合わせ試験では、LAW83での最大応力と同様に、損傷開始時の塑性変位を表す β_0 と、破壊時の塑性変位を表す β_f が必要です。

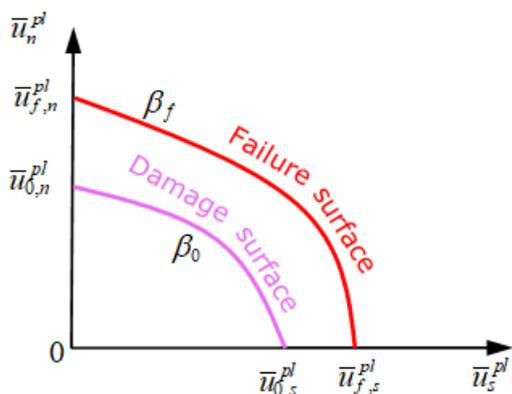


図 292:

モーメントを伴うスポット溶接(剥離試験)では、LAW83での最大応力と同様に、剥離試験の損傷開始時の塑性変位を表す α_0 と、剥離試験の破壊時の塑性変位を表す α_f が必要です。

表 20: 2つのスポット溶接モデリング手法の一般的な機能

		/MAT/LAW59+/FAIL/CONNECT		/MAT/LAW83+/FAIL/SNCONNECT
降伏曲線		2つの降伏曲線(法線方向とせん断方向)		最大応力を含む1つの正規化された降伏曲線 R_N, R_S
モード組み合わせ試験での最大応力		組み合わせ試験での法線とせん断の効果は考慮されません。		α を使用して、モード組み合わせ試験での法線とせん断の影響を考慮します。
破壊	破壊基準	変位基準	1方向破壊 多方向破壊	変位基準、 多方向破壊
		エネルギー基準	1方向破壊 多方向破壊	
	モード組み合わせ試験での破壊	変位基準の $\alpha_T, \alpha_N, \exp_T, \exp_N$ とエネルギー基準の N_b, N_t を使用して比例的に制御されます。		以下により制御 β_0, β_f
	モーメントの影響(剥離試験)	入力での制御なし		以下により制御 α_0, α_f

		/MAT/LAW59+/FAIL/CONNECT	/MAT/LAW83+/FAIL/SNCONNECT
	軟化	T_{max} , N_{soft} を使用(応力曲線は下降)	損傷変位と破壊変位に関連(応力は線形減少)

衝突についてのボルトのモデル化

ボルトの結合のモデル化、およびより詳細な結果精度のモデル化には、さまざまな方法があります。

- 剛体ボルト
- スプリング(およびプリテンション)を含む剛体ボルト
- スプリングおよびプリテンションを含む可変形ボルト
- 初期応力を含む可変形ボルト

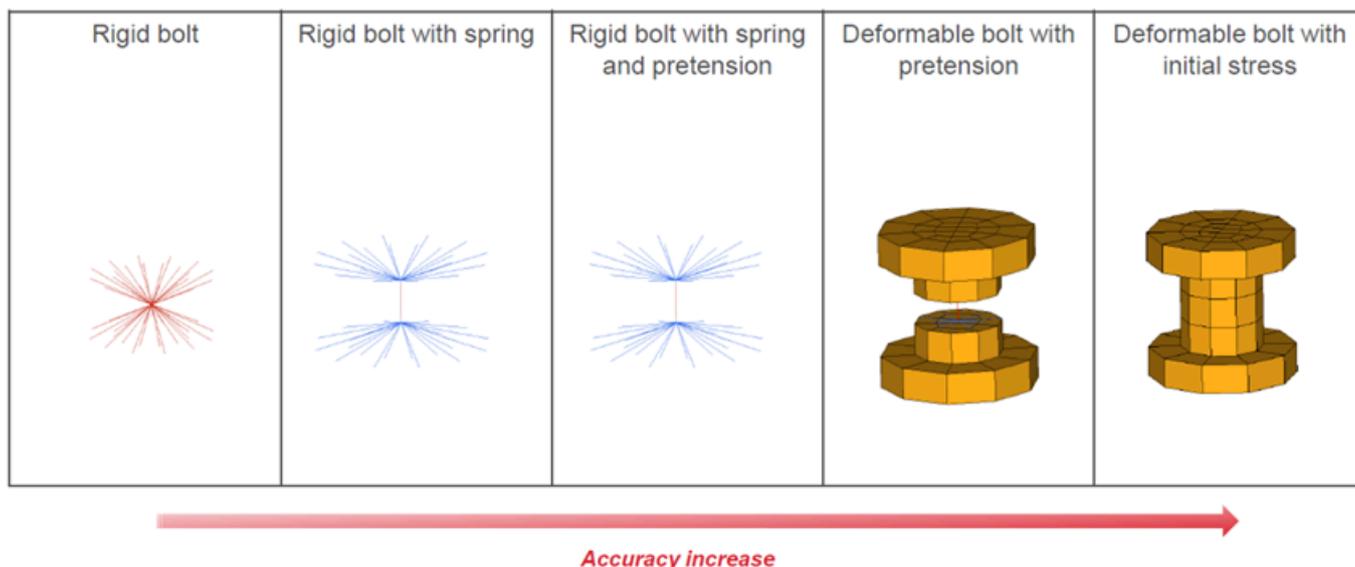


図 293: ボルトモデル化の手法

剛体ボルト

ボルトがリンクされるパートに結合される1つの剛体(/RBODY)を使用するのが最も簡単な方法です。この方法は非常に安定しており、モデル化も容易ですが、ボルトのプリテンション、弾塑性性、および破断挙動を考慮することはできず、力の出力はなく、穴を通過するボルトヘッドのモデル化はできません。

24. Pasligh, N., Schilling, R., and Bulla, M., "Modeling of Rivets Using a Cohesive Approach for Crash Simulation of Vehicles in Radioss," SAE Int. J. Trans. Safety 5(2):2017, doi:10.4271/2017-01-1472



図 294: 剛体ボルトモデル化の手法

 注: メイン節点はフリーの節点である必要があります。

スプリング(およびプリテンション)を含む剛体ボルト

ボルトにリンクされる各パートセットに結合される2つの剛体(/RBODY)を使用し、両方の剛体間にスプリング要素(/PROP/SPR_BEAM)を設定します。この方法では、任意の方向での弾塑性および破断挙動を記述することができ、/TH/SPRINGを使用して、ボルトを通過する力(垂直力、せん断力、モーメント)を出力することも可能です。この方法は、自動車の衝突解析によく使用されますが、プリテンションのモデル化機能は限定されます。

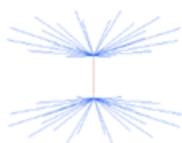


図 295: スプリングを含む剛体ボルト

 注:

1. メイン節点はフリーの節点である必要があります。
2. スプリング要素は、セカンダリ節点として剛体に付加されます。

この方法でプリテンションを記述するには、2つのスプリング要素(/PROP/SPR_PREと/PROP/SPR_BEAM)を追加する必要があります。プレロードのシミュレーションには/IMPDISPまたは/CLOADを使用できます。Radiossにより自動平衡状態が計算されます。

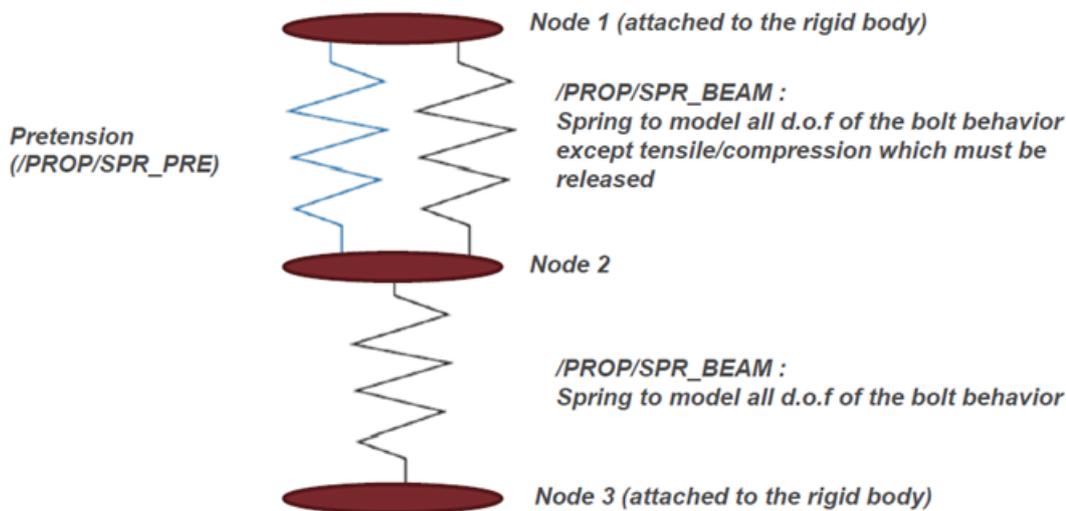


図 296: スプリングを含むプリテンションのモデル化

スプリングおよびプリテンションを含む可変形ボルト

ボルトはソリッド要素(/BRICKまたはその他のソリッド要素タイプ)でメッシングされ、中央で切断されています。メッシングされたボルトの各側に結合された2つの剛体、および上記のような剛体間の一連のスプリング(/PROP/SPR_BEAMによる2つのスプリングと/PROP/SPR_PREによる1つのスプリング)が、プリテンションの記述に使用されます。この詳細なモデルでは、穴を通過するボルトヘッドをシミュレーションで考慮することができます。

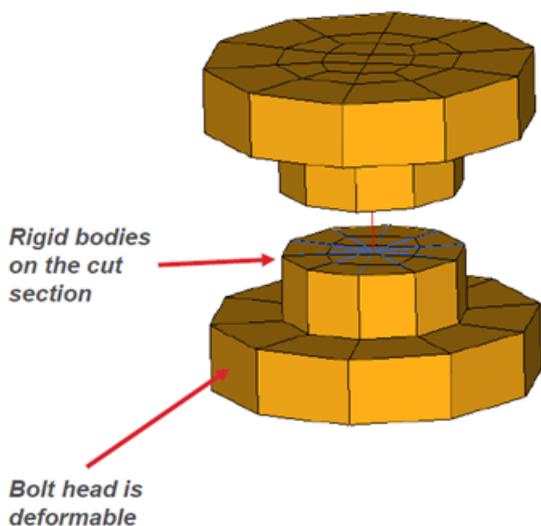


図 297: スプリングおよびプリテンションを含む可変形ボルト

初期応力を含む可変形ボルト

この方法では、ボルトがソリッド要素(/BRICK)で完全にメッシングされ、より現実的となっており、材料および破壊特性が容易に定義できます。/SECTを使用して、ボルト内の断面力 / モーメント(/TH/SECT)が取得されます。プリテンションを定義するには、初期解析(ボルトの引張り試験)を行うための初期応力(/INIBRI/STRS_F)が必要です。

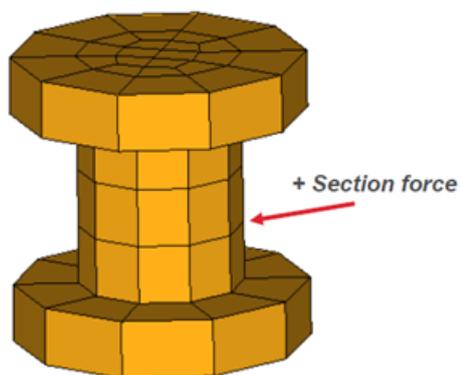


図 298: 完全にメッシュされた可変形ボルト



注:

1. 破断および応力の精度は、メッシュサイズに依存します。
2. 穴を通過する力の測定には、ボルト内の断面力が必要です。

運動学的拘束

Radiossでは、運動学的条件は節点のセットに作用する節点の拘束です。

多くの異なるタイプの節点拘束があります：

- 剛壁
- 剛体
- 境界条件
- タイドインターフェース
- 円筒ジョイント
- 剛結
- ギアタイプジョイント

Radiossで運動学的条件を与える数値的な手法は：

ペナルティ法	剛壁
メイン セカンダリ運動条件	インターフェースタイプ2、剛体
局所運動学的条件	剛結、円筒ジョイント
Lagrange乗数	新旧のインターフェース、剛壁、剛体など

剛体 (/RBODY)

剛体はセカンダリ節点のセットとメイン節点で定義されます。これは無限剛性のパートと比較することができます。セカンダリ節点間の相対変位は許されず、剛体の全体の移動はメイン節点に支配されます。

それぞれのセカンダリ節点には全ての方向に運動条件が与えられ、他の節点拘束は許されません。しかしながら、Lagrange乗数法の場合には、運動条件の非適合が無い場合には解を見つけることができます。

剛体の重心位置を決めるために4つのオプションが利用可能です：

ケース 1:	重心はセカンダリとメイン節点の質量と座標から計算 剛体の質量は付加された質量とセカンダリ節点質量の合計
ケース 2:	重心はセカンダリ節点の質量と座標のみから計算 剛体の質量は付加された質量とセカンダリ節点質量の合計
ケース 3:	重心はメイン節点の座標にセット 剛体の質量は付加された質量とセカンダリ節点質量の合計
ケース 4:	重心はメイン節点の座標にセット 剛体の質量は付加された質量

メイン節点には、Radioss Starterがメイン節点を移動させることもあるため、(要素の一部でなく)人工的な節点を用いることを強く推奨します。ICoGフラグが3または4に設定されていない限り、メイン節点はRadioss Starterにより重心に移動されます。最も現実的な挙動を得るために、ICoGは2に設定することが推奨されます。この場合、重心はセカンダリ節点のみを考慮して計算されます。ICoGが1に設定された場合は、重心の計算にメイン節点自身の質量が含まれます。

メイン節点が初期にその重心位置に置かれた場合、 $ICoG = 1$ または2を用いた時の挙動は同様です。

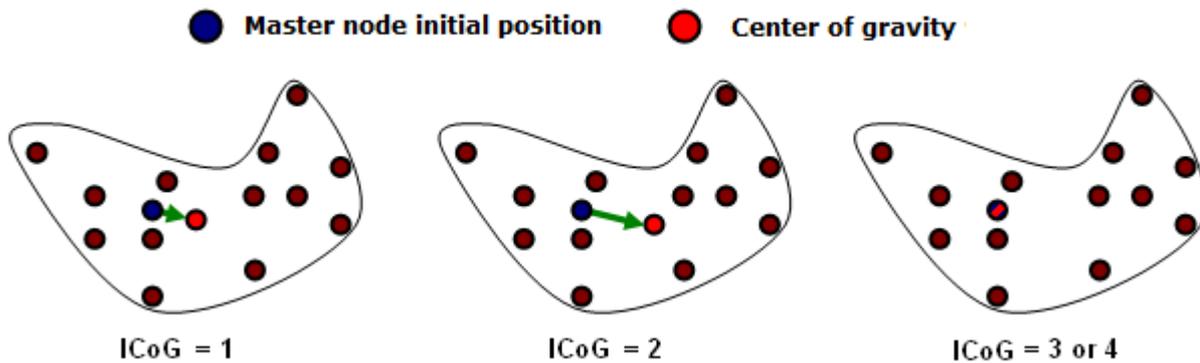


図 299: 重心計算

衝突のシミュレーションでは、剛体は広く用いられ、3つのタイプの剛体は区別できます：

- 剛体が有限要素モデルの一部をカバーし、シェル、ソリッドまたは他の要素を含む場合：このケースでは、セカンダリ節点の質量が剛体の全質量を与え、付加的な質量は必要ありません。メイン節点はどこに位置していても構いません。質量中心に移動されます。この種類の剛体では、CPU時間を大幅に節約できます。
- 剛体が構造節点に結合されているモデル化されていないコンポーネントを表現している場合：このケースでは、いくつかのセカンダリ節点が剛体を有限要素モデルに結合するために用いられます。質量と慣性が付加され、メイン節点はコンポーネントの質量中心に配置されます。メイン節点は、Sekandari 節点の質量を考慮に入れ、僅かしか移動しません。あるケースでは、剛体を可視化するためまたは接触をシミュレートするためにダミーのメッシュが用いられます、しかし、ダミー要素の質量が小さければ、前の注釈はなお正しいこととなります。
- 剛体が2つまたはそれ以上のパートの結合に用いられる場合：これらの剛体に対して付加質量は必要なく、メイン節点はどこにあっても構いません。これらの剛体に対しては球状慣性を用いる必要があります。これらの剛体は通常非常に小さく(4から8節点)、その慣性はしばしば、ある1方向に対しては非常に小さく1つの特定の方向に対しては非常に大きくなるためです。これは不安定を引き起こすことがあり、それ故球状慣性の使用を通して、慣性をどの方向に対しても同じにします。

アクティブ化 / 非アクティブ化

剛体は /SENSOR または Engine のオプション /RBODY/ON または /RBODY/OFF でアクティブ化または非アクティブ化することができます。

メイン節点のIDが1と2の2つの剛体をアクティブ化するためには、Rootname_0001.rad で以下のオプションを追加します：

/RBODY/ON

1 2

両方の剛体に含まれる全ての要素は非アクティブ化されます。

ID3のメイン節点1つの剛体を非アクティブ化するためには、以下を追加します：

/RBODY/OFF

3

全ての要素は再びアクティブ化され、ひずみと応力は前の非アクティブ時のものになります。

剛体移動

剛体のアクティブ化と非アクティブ化の主な使用法の1つは、ロールオーバーシュミレーションにおけるロールオーバー動作に関するものです。車両が自由に飛んでいる間、要素の変形は無視できます。飛んでいる間、構造全体を一時的に剛体に置き換えることができれば、CPU時間を大幅に節約できます。地面に接触する前に、剛体は非アクティブ化され、その後リバウンド後に再びアクティブ化されます。

Engine

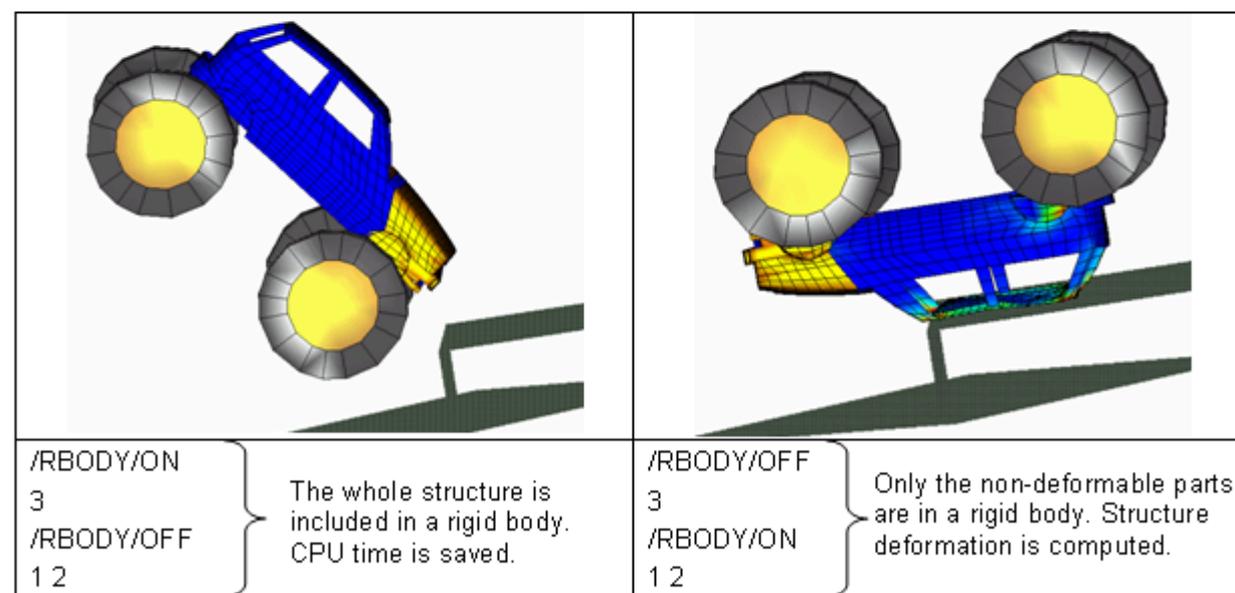
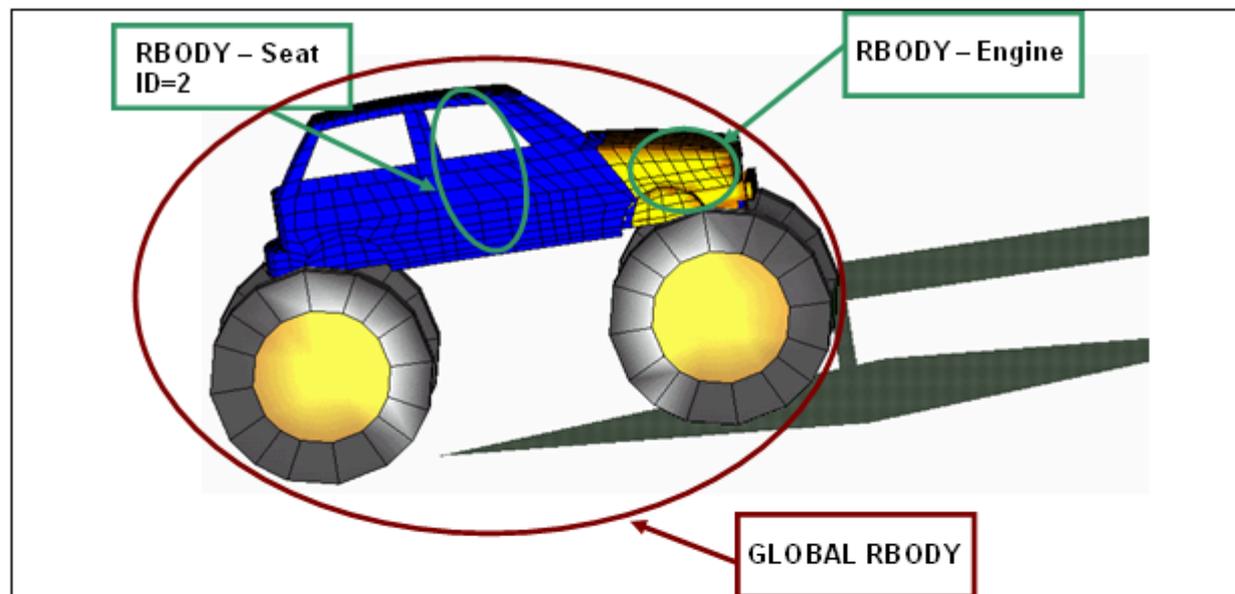


図 300: ロールオーバーの例題での剛体のアクティブ化 - 非アクティブ化

初期静的釣り合い

もう1つの剛体のアクティブ化と非アクティブ化の使用法は重力が作用した場合の初期釣り合いです。衝突解析では、サスペンション上で釣り合い状態にある車両全体やシート上のダミーのセットは興味のあることです。陽解法による解析では、静的釣り合いに到達するのに長い時間がかかるため、大きな剛体を使用することで早く解を得ることができます。しかしながら、このケースでは車両や重力下のダミーの変形は無視され、この仮定の有効性について注意深く見る必要があります。

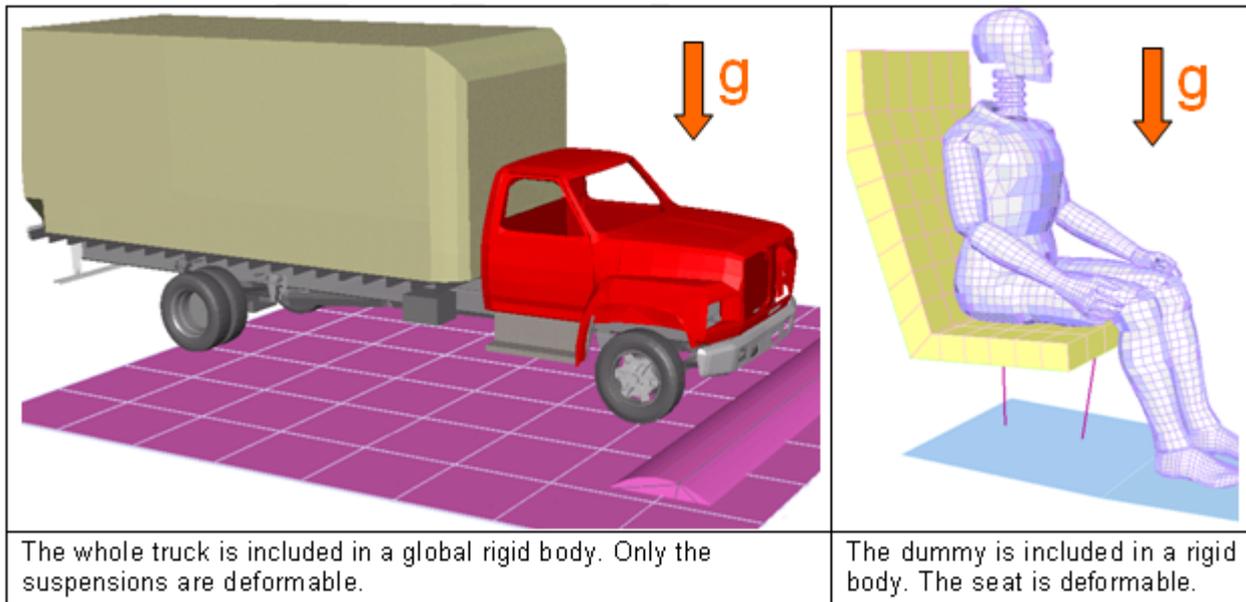


図 301: 静的釣り合いの例

剛体の統合(マージ)

/MERGE/RBODYオプションは、剛体の統合または既存の剛体へのセカンダリ節点の追加に用いることができます。定義されているセカンダリエンティティは、メイン剛体へのセカンダリとなります。セカンダリエンティティは、剛体、単一の節点、または節点のセットであることが可能です。/MERGE/RBODYで複数の行を定義することによって、複数のセカンダリエンティティを1つのメイン剛体に統合することができます。

メイン入力ファイルで統合を定義することで、2つの別々のインクルードファイルで定義された2つの異なるアセンブリを統合するという使い方もできます。これは、エンジンのような複雑なコンポーネントをモデル化するために、剛体として定義された別々のパートを1つの剛体に統合する必要がある場合にも役立ちます。

/MERGE/RBODYで定義されたメイン剛体は、別の/MERGE/RBODY内のセカンダリ剛体として定義できます。ただし、複雑な階層はデバッグが難しくなるので避けるべきです。セカンダリエンティティは、1つの/MERGE/RBODYでのみ定義でき、どの/RBODYでも定義できません。そうでない場合は、互換性のない運動条件が発生します。

マージの前に、各セカンダリおよびメイン剛体の慣性、質量、および重心が、それらの/RBODYプロパティに基づいて計算されます。次に、セカンダリエンティティがメインリジッドボディに統合され、/MERGE/RBODY Iflagオプションに基づいて新しい剛体のプロパティが計算されます。

剛壁(/RWALL)

剛壁は、節点が壁を貫通しないように一組のセカンダリ節点に適用する節点拘束です。剛壁との接触が検知されると、セカンダリ節点の加速度と速度が修正されます。

セカンダリ節点が接触しているかどうかを判断するためのギャップはありません。接触はセカンダリ節点が剛壁の表面に接触したときのみ起こります。フラグSlideの設定に応じて、スレーブ節点の接線速度を修正することもできます。デフォルト値(=0)では接触の間、純粋な滑りが可能になります。1に設定すると滑りは許されず、セカンダリ節点は接線方向に"固定"されます。2にセットされた場合、Coulombモデルに基づいた摩擦が可能になります。

Radiossでは、4つのタイプの剛壁が利用可能です:

- 無限平面剛壁
- 無限円柱剛壁

- 球面剛壁
- 有限平面剛壁

剛壁は固定または移動が使えます。固定剛壁は全ての接触する節点の純粋な運動条件で、移動剛壁は主要なセカンダリオプションと同様のオプションになります。メイン節点が各時間ステップでの剛壁位置を定義し、接触しているセカンダリ節点に速度を課します。接触しているセカンダリ節点の力はメイン節点に作用します。セカンダリ節点の力は、運動量の保存則に基づいて計算されます。接触しているセカンダリ節点の質量に比べて剛壁の質量が大きいと仮定すれば、セカンダリ節点の質量がメイン節点に伝達されることはありません。

無限平面剛壁

無限平面剛壁は無限に伸びる平面です。剛壁の法線を表現する2点で定義されます(図 302)。

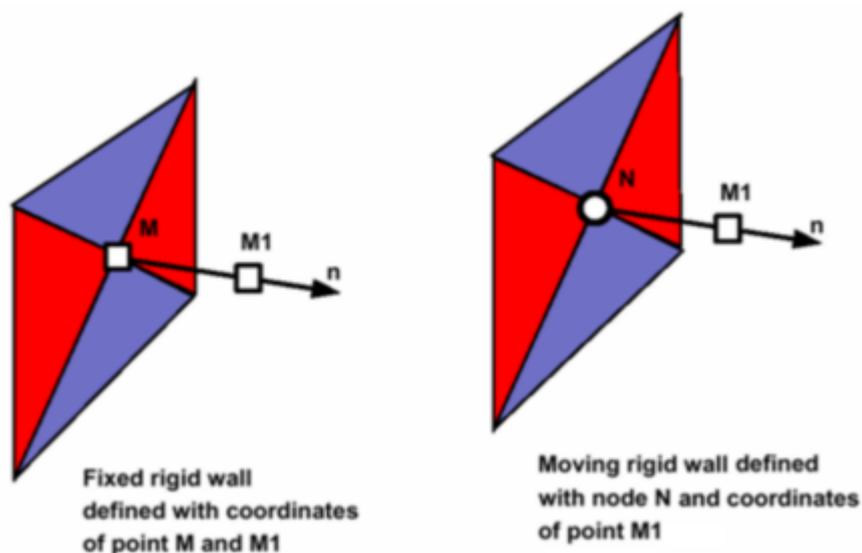


図 302: 無限平面剛壁

無限円柱剛壁

無限円柱面剛壁は無限に伸びる円柱です。2点 (または1点と1節点) と直径で定義されます。

 注: 接触は円柱剛壁の外側のみから可能です。

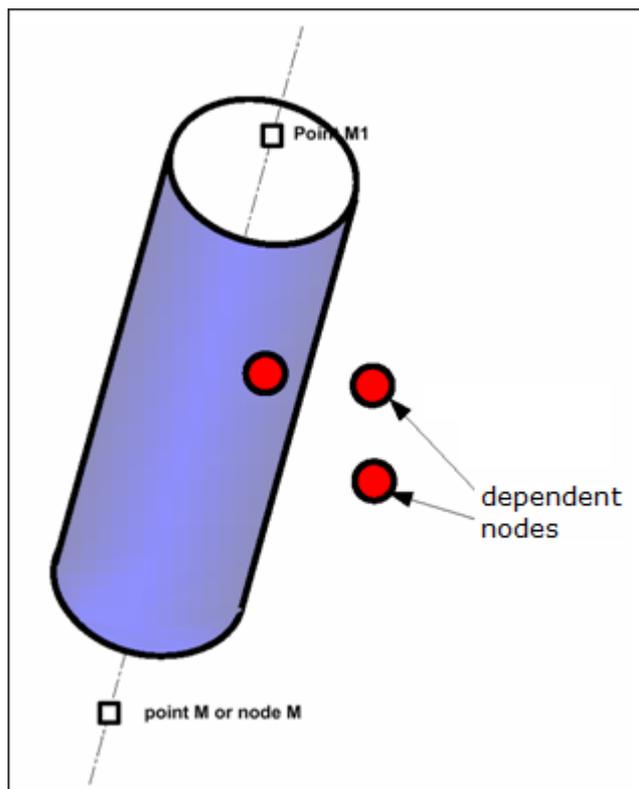


図 303: 無限円柱剛壁

球面剛壁

球面剛壁は点 M (または節点 N)と直径で定義されます。

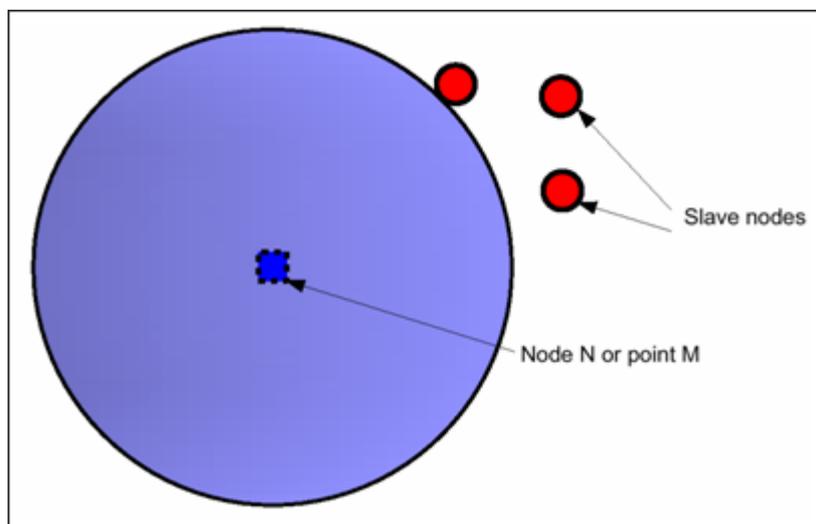


図 304: 球面剛壁

有限平面剛壁

有限平面剛壁は M 、 $M1$ 、 $M2$ の3つの点で定義される平行四辺形面です。移動剛壁の場合は、 M がメイン節点と見なされます。

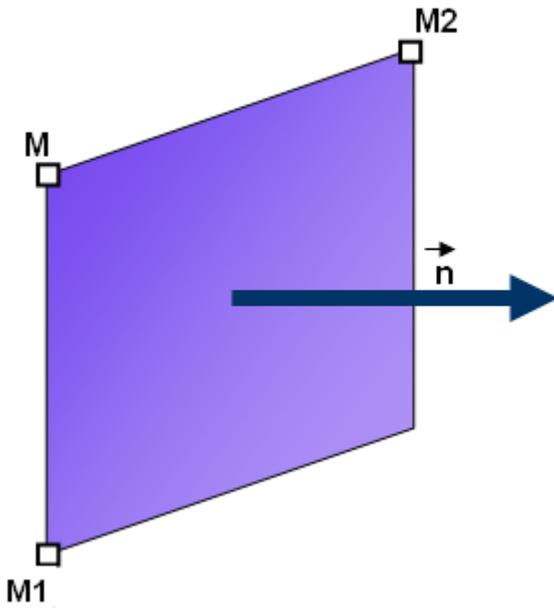


図 305: 有限平面剛壁

コメント

1. シミュレーションの間、移動剛壁はメイン節点 N に追従しますが、壁の向きは一定のままで、初期法線に平行です。移動剛壁はモーメントのつり合いは考慮せず、力のつり合いのみが与えられます。そのため、外部モーメントはラボラトリーから壁に作用します。
2. セカンダリ節点を壁からの距離のみで定義した場合、距離が正または0のセカンダリ節点が考慮されます(つまり、無限剛壁の背面や円柱剛壁内部にある節点はセカンダリとして考慮されません)。
3. 初期に剛壁内に接触している節点は、1サイクルで外壁の外側に飛び出せるほど十分に高いリバウンド速度の場合を除いて、リバウンドできません。
4. ランダムノイズを節点座標に加えると、セカンダリ節点の初期位置が修正され、移動剛壁の場合には壁の位置が変化します。そのため、壁からの距離が0または0に近い値であるセカンダリ節点は壁の内部に移動する可能性があります。セカンダリ節点を距離で定義している場合、これらの節点はセカンダリ節点ではなくなります。これらの節点が明示的なセカンダリ節点の場合、これらの節点はリバウンドすることなく壁の内部に留まります。
5. ランダムノイズ(/RANDOM)で移動剛壁の向きも影響を受けます。メイン節点 N の位置はランダム値で移動され、節点 N と点 $M1$ で定義した法線が変更されます。これは特に点 $M1$ が点 N に近い場合は重要です。

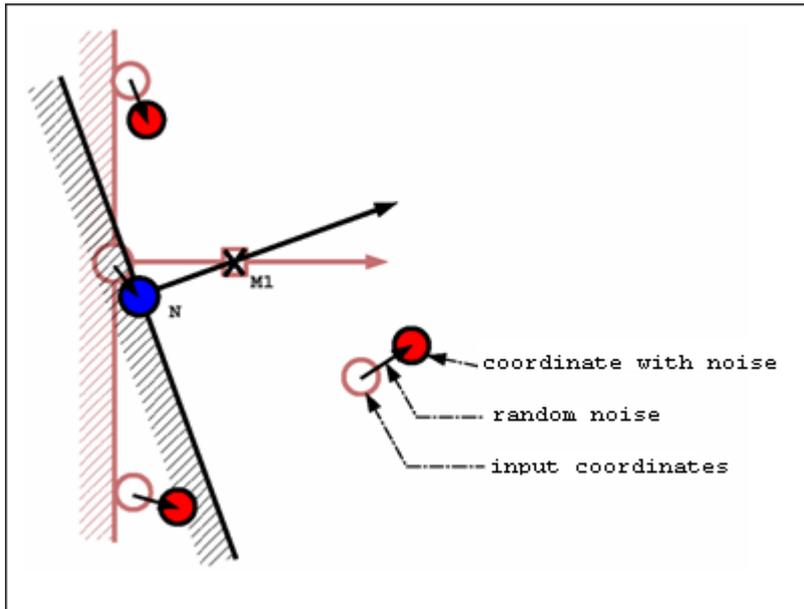


図 306: ランダムノイズによる壁の向きの変化

タイド接触 (/INTER/TYPE2)

インターフェースタイプ2は、タイドインターフェースとも呼ばれ、セカンダリ節点とメインサーフェスを剛に結合する節点拘束です。セカンダリ節点の力とモーメントはメイン節点に伝達され、セカンダリ節点はメイン節点の移動に伴い、運動学的に位置が決まります。

このインターフェースは完全な力とモーメントのつり合いが保証されます。

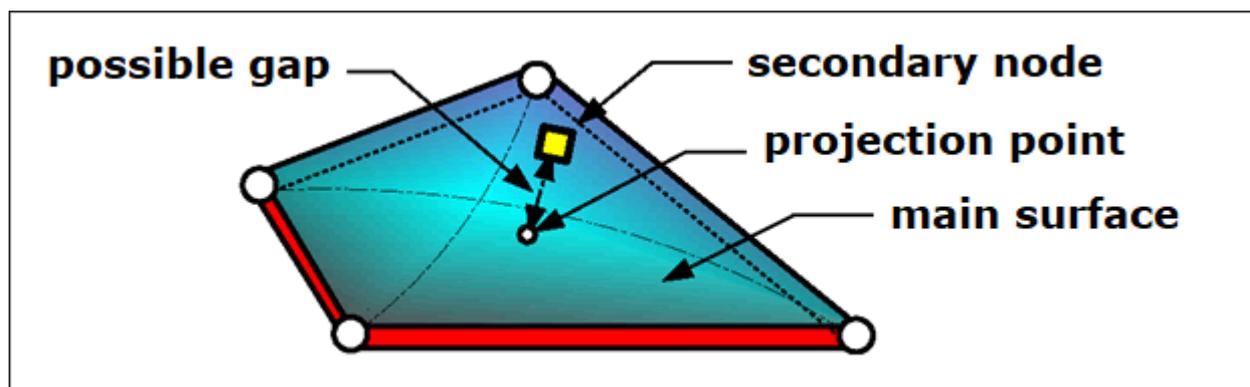


図 307: インターフェース2 - タイド

この結合を記述する4つの定式化が利用可能です。

- デフォルトのスポット溶接の定式化
- 最適化されたスポット溶接の定式化
- 破壊を伴う定式化
- ペナルティ定式化

デフォルトのスポット溶接の定式化

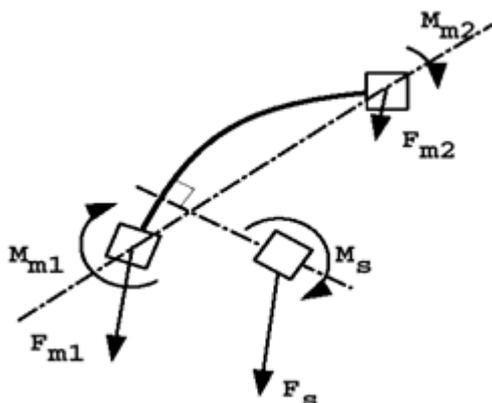
 $Spot_{flag}FLAG=0$


図 308:

フラグが0にセットされた時、spotflag定式化はデフォルトの定式化になります:

- 要素の形状関数に基づく
- 低減積分要素ではアワグラスを生成する
- セカンダリ節点の局所化の結合剛性関数を与える
- 完全積分シェル(メイン)での利用を推奨
- ソリッドのセカンダリ節点とソリッドのメインセグメントとの結合に推奨(回転自由度のないメッシュの遷移)

最適化されたスポット溶接の定式化

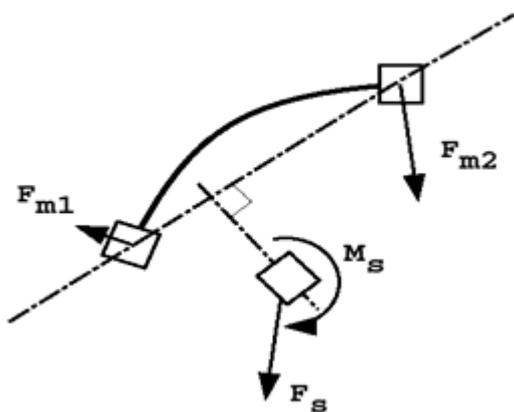
 $Spot_{flag}FLAG=1$


図 309:

フラグが1にセットされた時、spotflag定式化は最適化された定式化になります:

- 要素の平均剛体移動に基づく
- アワグラスの問題なし
- 一定の結合剛性

- 低減積分シェル(メイン)での利用を推奨
- ビーム、スプリング、シェルのセカンダリ節点のソリッドのメイン節点への結合に推奨

破壊を伴う定式化

$Spot_{flag}FLAG=20, 21$ および22

これらのオプションを使用して、以下の2つの破壊基準を定義できます：

$Rupt = 0$ (独立破断パラメータ)：

Max_N_Dist または Max_T_Dist に達したときに破壊が生じる(デフォルト)

$Rupt = 1$ (連成破断パラメータ)：

$$\text{右記の場合、破壊；} \sqrt{\left(\frac{N_Dist}{Max_N_Dist}\right)^2 + \left(\frac{T_Dist}{Max_T_Dist}\right)^2} > 1$$

計算時には、直応力、せん断応力、法線変位および接線変位が求められ、インターフェースで定義されている最大値と比較されます。最大基準に達すると直ちに、直応力とせん断応力が0に設定されます。

ペナルティ定式化

$Spot_{flag}FLAG=25$

ペナルティ法を使用するインターフェースタイプ2の主な目的は、運動学的拘束なしでセカンダリ節点をメインセグメントに固定させることです。ペナルティ法を使用することにより、

“運動条件の非適合”を回避できる可能性があります。

円筒ジョイント(/CYL_JOINT)

円筒ジョイントは2つのセカンダリ節点で1つの特定の方向が定義されることを除き、剛体と同様です。全ての節点はこの方向には自由に移動でき、その軸周りの回転が自由です。

この特定の方向を定義する最初の2つの節点を含め全てのセカンダリ節点に運動条件が適用されます。メイン節点は使用されません。

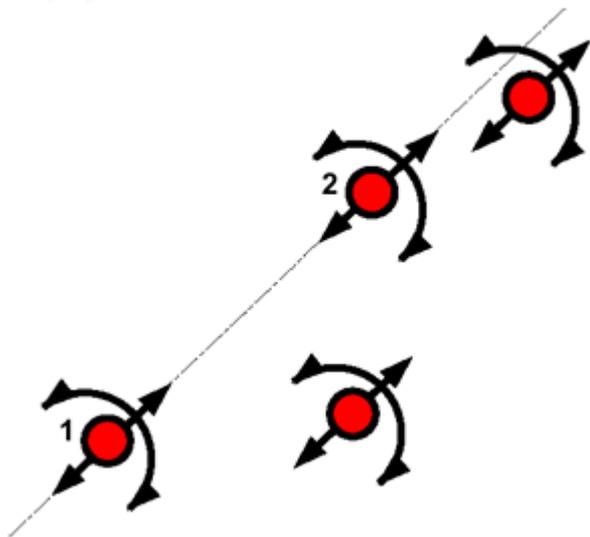


図 310: 円筒ジョイント

初期の状態ですべてのセカンダリ節点が整列している場合、常にその整列状態を保ちます。図 310に示されているように、回転自由度はそれぞれの節点での局所回転のことであり、軸1-2周りの全体の回転ではありません。したがって、円筒ジョイントは1の節点に用いることが推奨されます。

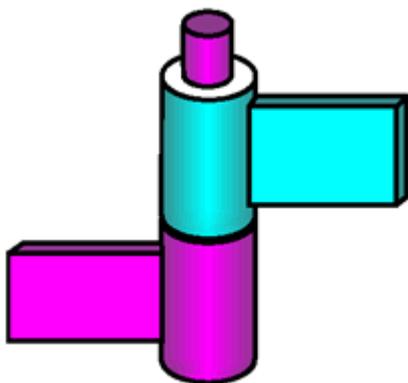


図 311: ドアヒンジの例

図 311 は、円筒ジョイントを用いてどのようにヒンジがモデル化されるかの例です。円筒ジョイントは節点2、5、3、4から構成されます。ヒンジのモデル化では、現実的な回転を得るためには節点を整列させる必要があります。このため、ビームまたはその他の有限要素を使用して、節点1-2、2-5、4-3、および3-6が結合されています。最後に、結合を改善するために、非線形弾性スプリングを使用して節点2-3をリンクします。

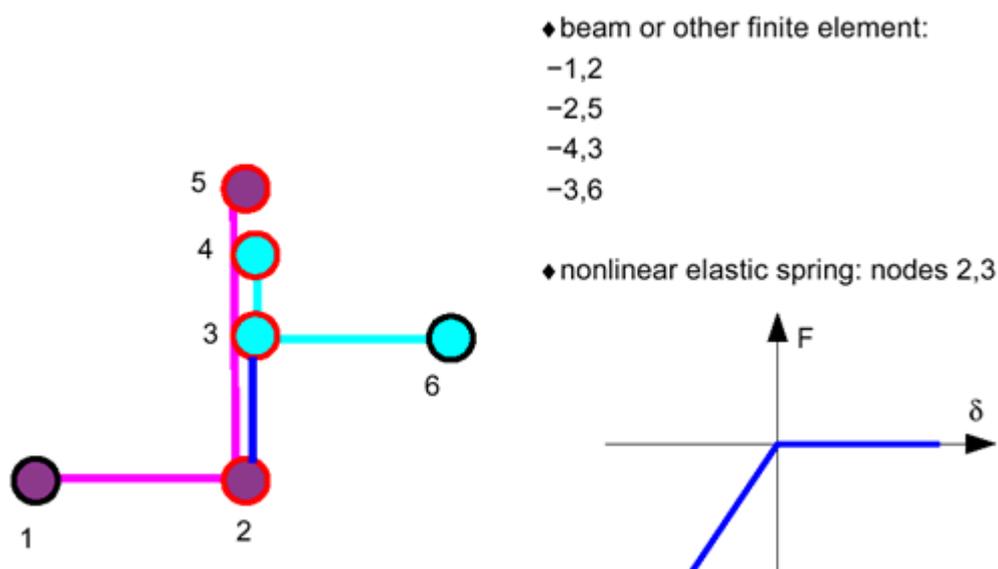


図 312: ヒンジのモデル化

剛結 (/RLINK)

剛結は全てのセカンダリ節点の1つまたは複数の方向に同じ速度を適用するオプションです。方向はスキューフレームまたは全体座標で定義され、速度は運動量保存で計算されます。

全体のモーメントのつり合いは考慮されません。剛結は、無限の剛性を持つタイプ8のスプリングと等価です。

注: 剛結はRadioss Engine入力です。剛結は現在のリスタート実行の間のみ有効です。永続する剛体の場合、それぞれのEngine入力ファイルで繰り返される必要があります。

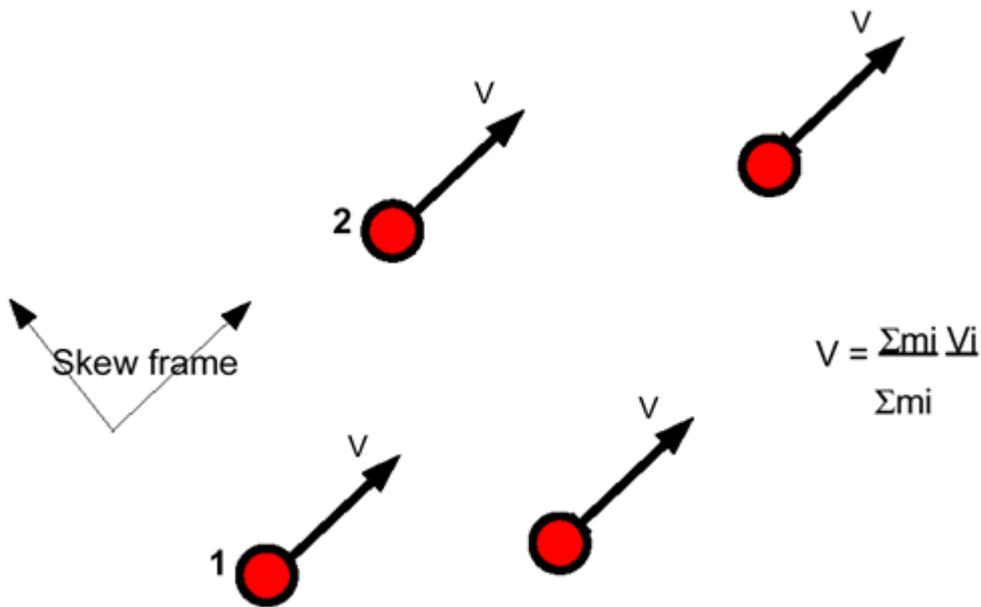


図 313: 剛結モデル

多点拘束 (/MPC)

ギアタイプジョイントは他の運動学的ジョイントよりもより複雑です。これにはLagrange乗数法を用い、全ての他のLagrange乗数法の運動条件と適合しますが、古典的な運動条件とは一切適合しません。

以下にこれらの3つのジョイントの例を説明します：

- 回転ギアタイプジョイント
- ラックアンドピニオンジョイント
- ディファレンシャルギアジョイント

慣性と質量は全ての節点に付加されます。MPCジョイントにより、節点の速度間関係が設定されます。MPCは質量のない節点の並進自由度と慣性のない節点の回転自由度に与えることはできません。

回転ギアタイプジョイント

このジョイントは入力と出力節点の間の回転速度の関係を与えるのに用いられます：

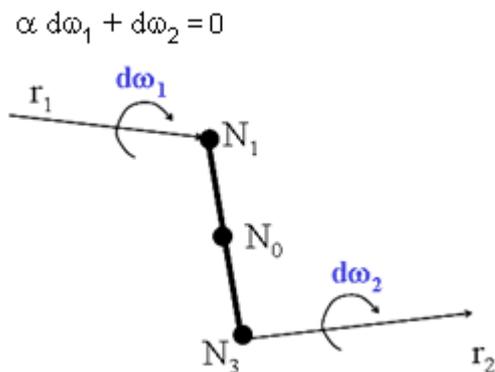


図 314: 回転タイプジョイント

ギアジョイント節点の並進速度は、剛性リンクの関係による制約を受けます。回転自由度に関しては、節点 N_1 と N_2 の速度の間に、局所座標系で測定された、スケールファクターが与えられます。対応する拘束方程式は：

$$\alpha(\Delta\omega_1 \cdot r_1) + (\Delta\omega_2 \cdot r_2) = 0$$

$$\Delta\omega_1 \cdot s_1 = 0, \quad \Delta\omega_2 \cdot s_2 = 0, \quad \Delta\omega_1 \cdot t_1 = 0, \quad \Delta\omega_2 \cdot t_2 = 0$$

ここで、 $\Delta\omega_1 = \omega_1 - \omega_0$ 、 $\Delta\omega_2 = \omega_2 - \omega_0$ は、節点 N_1 および N_2 の剛体回転速度に対する相対回転速度です。

ラックアンドピニオンジョイント

このジョイントは節点の回転速度を次のように並進速度に転換します：

$$\alpha d\omega_1 + dv_2 = 0$$

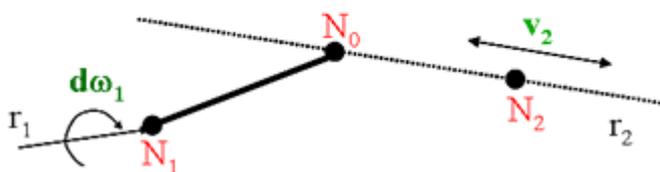


図 315: ラックアンドピニオンジョイント

これらの速度の拘束方程式は：

$$\Delta\omega_1 = \omega_1 - \omega_0, \quad \Delta\omega_2 = \omega_2 - \omega_0 \tag{207}$$

$$\alpha(\Delta\omega_1 \cdot s_1) + (\Delta V_2 \cdot s_2) = 0 \tag{208}$$

$$\alpha(\Delta\omega_1 \cdot t_1) + (\Delta V_2 \cdot t_2) = 0 \tag{209}$$

ディファレンシャルギアジョイント

このジョイントは、1つの入力節点と2つの出力節点の間の回転速度の関係を次のように与えます：

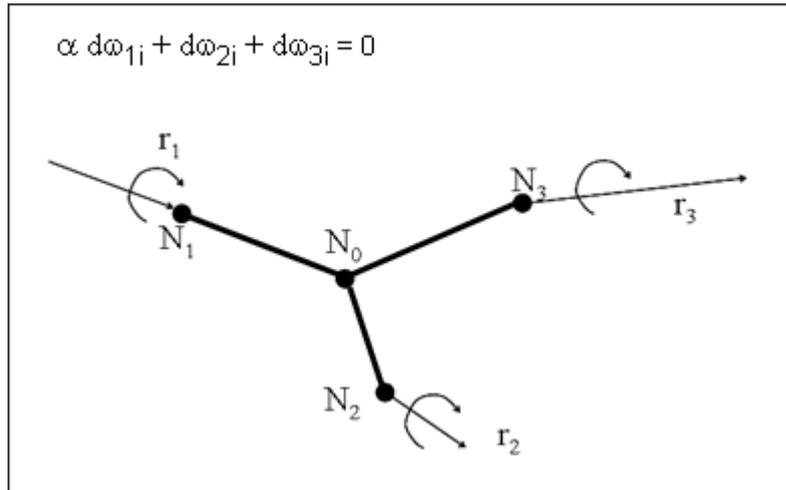


図 316: デイファレンシャルジョイントタイプ

デイファレンシャルギアジョイントの回転速度は、下記の関係による制約を受けます:

$$\alpha(\Delta\omega_1 \cdot r_1) + (\Delta\omega_2 \cdot r_2) + (\Delta\omega_3 \cdot r_3) = 0 \quad (210)$$

$$\alpha(\Delta\omega_1 \cdot s_1) + (\Delta\omega_2 \cdot s_2) + (\Delta\omega_3 \cdot s_3) = 0 \quad (211)$$

$$\alpha(\Delta\omega_1 \cdot t_1) + (\Delta\omega_2 \cdot t_2) + (\Delta\omega_3 \cdot t_3) = 0 \quad (212)$$

運動条件を与える手法

Radiossで運動条件を与える数値的な手法は以下のとおりです:

ペナルティ法(剛壁)

節点変位はペナルティ力を与えることにより拘束されます。

メイン セカンダリ運動条件(インターフェースTYPE2および剛体)

すべてのセカンダリ節点は独立性を失います。セカンダリ節点の自由度はメイン節点または要素の関数として表現されます。

局所運動条件(剛結および円筒ジョイント)

拘束方程式は、局所運動条件を満足させるために、節点に適用されます。メイン節点は使用されません。

Lagrange乗数(Radioss V44)

この方法は拘束の下でのつり合い方程式の非線形解法から成っています。インターフェース、剛壁、剛体および境界条件などの一部の古典的運動条件では、この手法はオプションです。ギアジョイントおよびインターフェースタイプ16と17などのいくつかの新しい運動条件に対してはこの方法だけが利用できます。

この方法は一般的に他の方法が適用できない場合に用いられます。例えば節点のサーフェスへの接触の際、運動条件が厳密に満足されなければならない時などです。ただし、この方法はNewton-Raphson法による方程式の非線形解法に基づいているため、一般的な場合、その効率は劣ります。

運動条件の非適合

節点の拘束は、節点自由度に作用する運動条件に基づいているため、2つの節点拘束を同じ節点セットに適用することはできません。ただし、与えられる運動条件が完全に直交する場合（例：X方向における境界条件とY方向における剛体リンクなど）はこの限りではありません。

Radioss Starterは、同じ節点セットに2つの節点拘束が与えられた場合、毎回以下のワーニングを出します。

```
WARNING ID: 147
*** WARNING: INCOMPATIBLE KINEMATIC CONDITIONS
2 KINEMATIC CONDITIONS ON NODE xxxxxxx,
IN DIRECTION TRANSLATION X, FOR:
- Nodal constraint 1 (e.g. BOUNDARY CONDITION)
- Nodal constraint 2 (e.g. RIGID WALL)
```

運動条件の非適合に関する全てのワーニングに対し注意を払うことは非常に重要です。実際に非適合となる運動条件（例えば複数の剛体に属する節点）は、エネルギーの発生や局所的な不安定を引き起こす原因となる可能性があります。このような場合、結果の精度を大きく下げます。

運動条件が実際に非適合である際、Radioss Starterはチェックを行いません。したがって、ワーニングが出されてもそれらが完全に直交する場合には無視して構いません。図 317 に2つのケースを示します。最初のケースは、節点が剛壁のセカンダリ節点で境界条件が直交しない方向にある場合です。剛壁が固定されている場合、非適合条件の可能性はありません（節点は剛壁には接触しないため）。移動剛壁の場合は、接触後の両方の条件を考慮することはできません。そのため、境界条件が与えられず、剛壁の反力は間違ったものになります。2番目のケースは、節点が2つの平行な剛壁のセカンダリ節点の場合です。2つの剛壁が固定されている場合、節点は2つの剛壁に同時に接触できないために、運動条件の非適合の可能性は有りません。1つの剛壁が移動する場合も、移動剛壁が固定剛壁と交差しない限りは問題ありません。

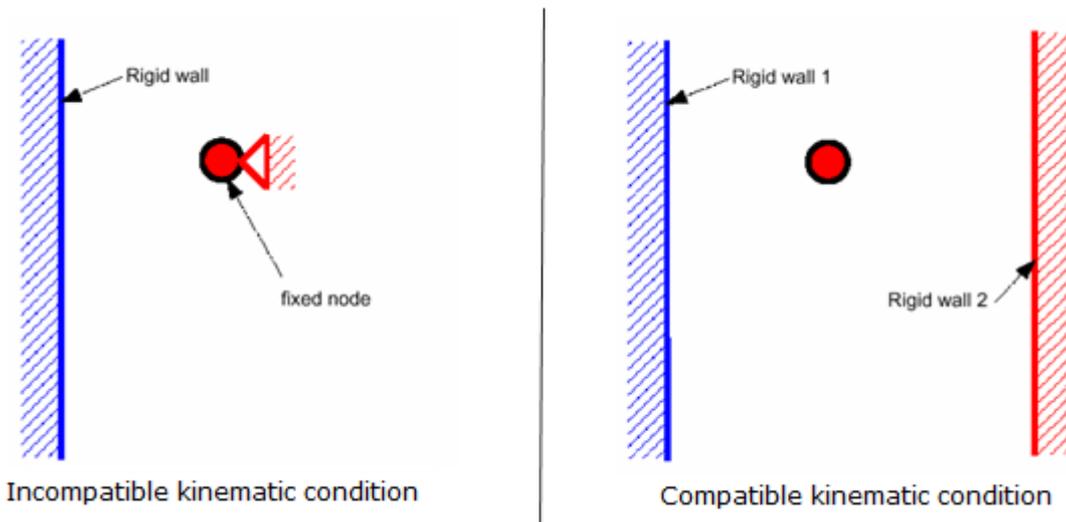


図 317: 運動条件についてのRadiossワーニング

マルチプロセッサのRadiossバージョンでは、ある運動条件が非適合だと2回の実行結果が異なる結果となる可能性があります。これはオプション/PARITH/ONが使われている場合でも起こり得ます。例えば、図 318に示されたようにセカンダリ節点が2つの直交しない剛壁に接触する場合、マルチプロセッサにより得られた結果は異なる可能性があります。剛壁1が剛壁2よりも前に計算された場合、速度V0は速度V12に置き換えられます。剛壁2が剛壁1よりも前に計算された場合は、速度V0は速度V21になります。マルチプロセッサコンピューターでは、どちらの剛壁が与えられるか、また、どの運動条件が与えられるかの順番は任意に決まり、あるサイクルから次のサイクル、または、ある実行から次の実行までに変更されます。

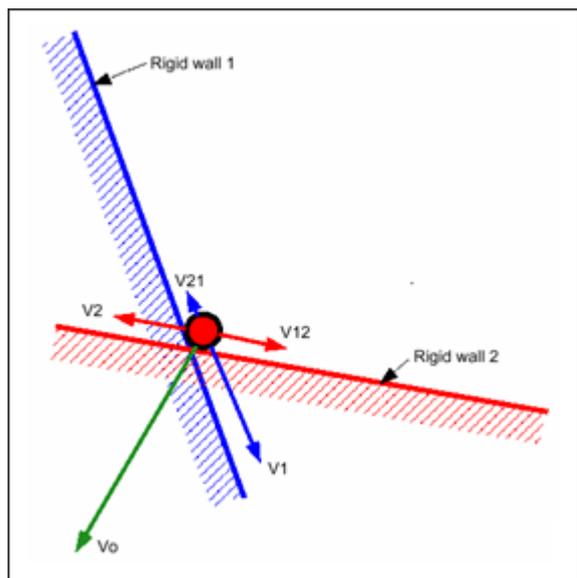


図 318: 運動条件の非適合での任意結果

Langrange乗数法が利用可能で、全てのLangrange乗数拘束の全体方程式を解くことにより、複数の節点拘束を同じ節点セットに与えることが可能です。ただし、両方の方法を同じセットの節点に混在して与えることはできませんが、両方の方法はそれらが異なる節点に対して与えられる限り、モデルで問題なく使うことができます。

インターフェース

Radiossではいくつかのインターフェースが利用可能ですが、このセクションでは接触インターフェースのみを取り扱います。それぞれのインターフェースはそのタイプ番号で区別されます。

インターフェースタイプ2は運動学的条件で2つの Lagrangeメッシュの結合に用いられるため、このセクションでは取り扱いません(運動学的拘束をご参照ください)。簡単な接触インターフェースの概要を表 21に示します。

これらのインターフェースのそれぞれは特定の適用分野のために開発されましたが、それ以外の分野でも利用することはできます。それぞれのインターフェースに用いられている異なるアルゴリズムの制限内容によってその選択を決めることもできます。

アルゴリズムの制限は主として接触するセグメントの探索に関するものです。この検索には直接行われるもの(インターフェースタイプ7、10、および11)、または最も近い節点を探すもの(その他のインターフェースタイプ)があります。最も近い節点の探索は処理時間が短い傾向がありますが、アルゴリズムには制限があります(インターフェースタイプ3、5、および6)。

インターフェースタイプ3、5、および6は、最も近い節点に結合されたセグメント間での選択に関しても制限があります。法線方向はこれらのインターフェースの制限の1つです。

インターフェースタイプ23は、エアバッグの布に対する接触インターフェースを定義します。これは、折りたたまれたエアバッグのメッシュによく見られる貫通および交差を扱うことができる、穏やかなペナルティ接触です。

インターフェースタイプ24は一定のペナルティ剛性を使用するため、時間ステップは影響を受けません。

熱摩擦はインターフェースタイプ7と21を使用して計算できます。

表 21: Radiossにおけるインターフェース

タイプ	内容	適用分野	接触の取り扱い
1 / 9	スライディングでのALE / LAG	流体 / 構造連成相互作用	メイン-セカンダリ
2	タイドインターフェース	メッシュ密度の変更(ソリッド)	メイン-セカンダリ、またはLM
3 & 5	2つのパート間の接触 / 衝撃	TYPE7を使用することを推奨します。	ペナルティ
6	2つの剛体間の衝撃 / 接触	ユーザー定義の接触	ペナルティ
7	2つのパート間の汎用接触 / 衝撃	全ての速度でのソリッドの接触 / 衝撃	ペナルティまたはLagrange乗数
8	ドロービード接触	スタンピング用途	ペナルティ
10	タイプ7と同様、しかしタイド接触	特別な目的のインターフェース	ペナルティ
11	2つのラインの衝撃	ビーム、バー、またはスプリング	ペナルティ
12	流体 / 流体接触	流体と流体の接触	ペナルティ
16 & 17	節点と2次ソリッドとソリッド-シェルの間または2次曲面間の接触	8節点か16節点厚肉シェル、または20節点ソリッド	Lagrange乗数

タイプ	内容	適用分野	接触の取り扱い
18	CEL Lagrange / Eulerインターフェース	流体-構造連成相互作用	ペナルティ
19	インターフェースTYPE7とTYPE11の組み合わせ	全ての速度でのソリッドの接触 / 衝撃、およびビーム、バー、またはスプリング	ペナルティ
21	剛体のメインサーフェスとセカンダリサーフェス間に固有のインターフェース	スタンピング	メイン-セカンダリ
23	ソフトペナルティ接触	エアバッグ	ソフトペナルティ
24	一般的な接触インターフェース、オプションの単一サーフェスあるいはサーフェス対サーフェスまたは節点对サーフェス接触	このインターフェースは、インターフェースタイプ3、5、7に代えて使用できます。	ペナルティ剛性は一定であるため、時間ステップの影響は受けません。

接触の取り扱い

接触の取り扱いには2つのアプローチがあります：

- ペナルティ法は陽解法コードで最も一般的な方法で、ほとんどの Radiossインターフェースで利用できます。
- Lagrange乗数法(/LAGMULおよび/INTER/LAGMUL)は、特殊なケーススタディで使用されます。

ペナルティ法

ペナルティ法を用いたインターフェースは、メイン / セカンダリ処理に基づいています。接触は、セカンダリ節点セットとメインセグメントセットの間にのみ起こります。メインセグメントはその要素のタイプによって定義されます。3節点または4節点シェルの場合、セグメントは要素の表面となります。ソリッド要素の場合、セグメントはフェイスとして定義されます。2Dソリッド要素(Quad)の場合、セグメントは辺です。

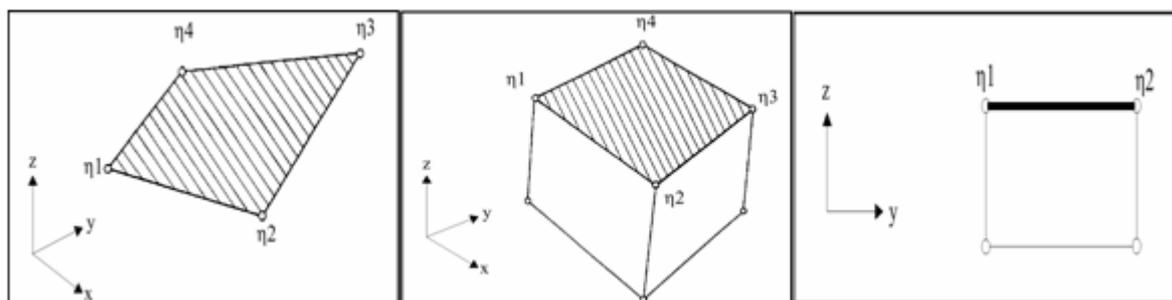


図 319: セグメントの定義

ギャップ距離は節点がセグメントに接触しているかどうかを判定するために定義されます。

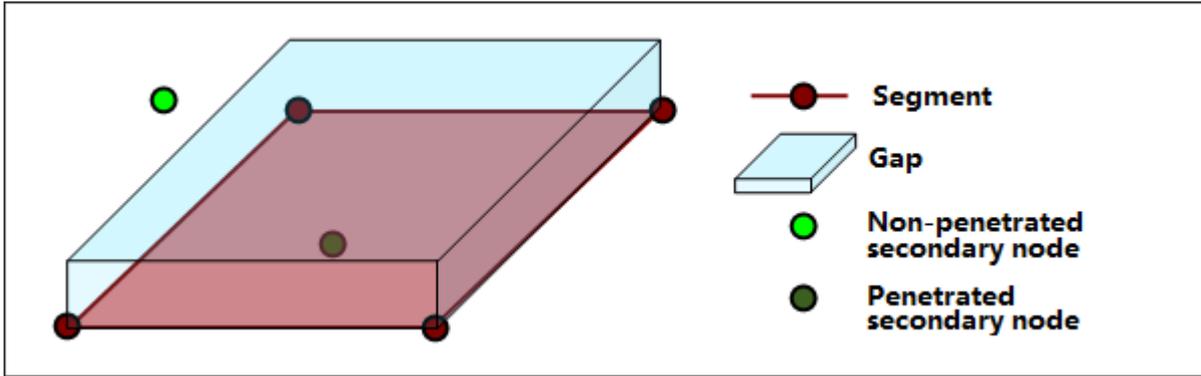


図 320: ギャップと貫通

節点がギャップ内に入るとすぐ、セカンダリ節点とメインセグメントの間に弾性スプリングが付加されます。これにより、抵抗力がセカンダリ節点を押し戻すようになります。

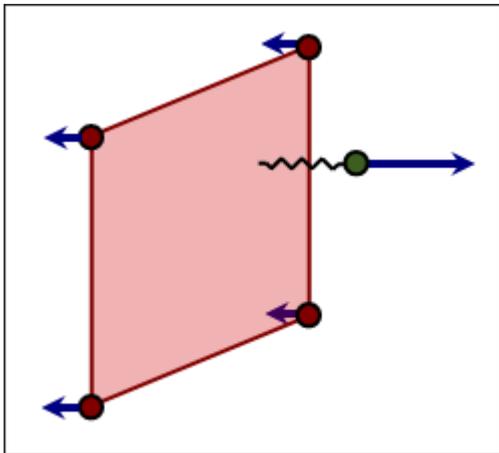


図 321: インターフェースの反力

時間ステップはインターフェース剛性に影響されることがあります。貫通の間、セカンダリ節点にスプリングが結合されるため、そのスプリング剛性が要素に作用する全ての剛性(この節点に結合されているすべての要素からの剛性)に付加される必要があります。節点の時間ステップはスプリング剛性を考慮して減少されなければならないこととなります。

$$dt = \sqrt{\frac{2M_{node}}{K_{node} + K_{spring}}} \tag{213}$$

接触は貫通した節点がギャップの外側に完全に押し出されたときに終了します。したがって、弾性スプリングと反力は除去されます。

ペナルティ法の接触インターフェースは全ての運動条件(剛体、強制速度など)と完全に互換性があります。

Lagrange乗数法 (/LAGMULおよび/INTER/LAGMUL)

ペナルティ法とは異なり、Lagrange乗数法は純粋に数学的であるため、接触のモデル化に物理的な要素(スプリング)は必要としません。接触条件を計算するために非線形系の方程式が解かれます。このため、高い接触剛性による時間ステップの破壊は起こりません。しかし、新しい式が非線形ソルバーで解かれるために、1サイクルでより多くのCPU 時間を必要とします。この方法は接触面上でセカンダリ節点を止めること(接触条件が厳密に満足されます)に優位点があります。しかしながら、摩擦は計算できません。

対称インターフェース(/INTER/TYPER3)

このインターフェースは2つの面の間の対称接触のシミュレートに用いられます。

両方の面が向きのあるセグメントの使用を通して定義されます、このため、接触は1つの側面でのみ可能です。両方のサーフェス上のそれぞれの節点はセカンダリ節点として考慮され、それぞれのサーフェスはメインセグメントとして考慮されます。

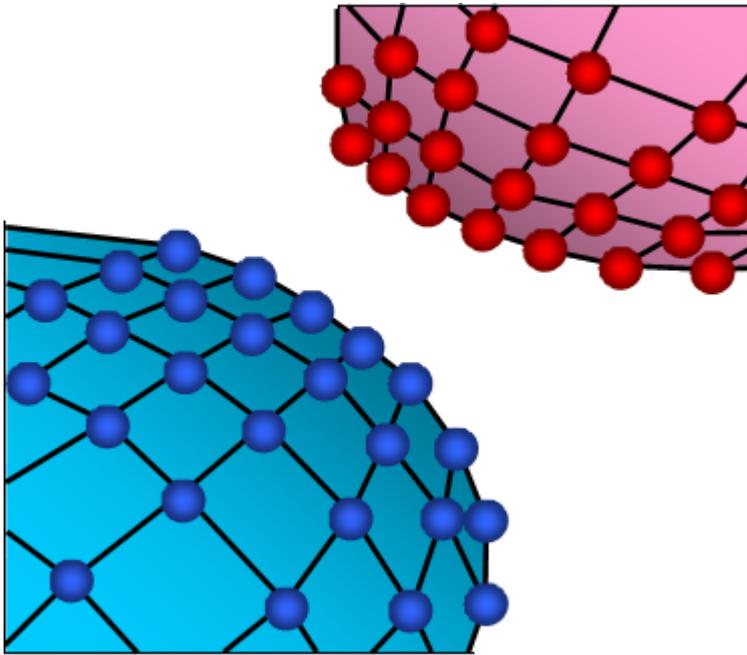


図 322: インターフェースTYPE3

インターフェースタイプ5とは異なり、インターフェースタイプ3には2つのメインサーフェスがあります。したがって、接触アルゴリズムが2回実行されます。最初の過程では第1のサーフェスの節点の第2のサーフェスに関する貫通が解かれます。2番目の過程では第2のサーフェスの節点の第1のサーフェスに関する貫通が解かれます。これでインターフェースタイプ5に比べて高い精度が得られますが、より多くのCPU時間が必要になります。

接触が検知されたとき、弾性スプリングが付加され、スプリングの剛性は両方のサーフェスの剛性を用いて計算されます。材料と幾何学的特性に基づき、それぞれのサーフェスに剛性が与えられ、次に全体のインターフェース剛性が計算されます:

$$K = s \frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2} \quad (214)$$

剛性のスケールファクターのデフォルト値は0.2で、安定性の理由からこの値は修正すべきではありません。しかしながら、 K_2 分の K_1 が100より大きい(または0.01より小さい)場合、多くの貫通を避けるため剛性のスケールファクターを増加させることが推奨されます。スプリングの剛性は一定で、セカンダリ節点がメインセグメントの中立面を通過することを許します。

このインターフェースは自動接触をシミュレートすることはできず、節点は両方のサーフェスに属することもできません。

注: このインターフェースは初期状態で接触しているシェルの平面に用いられます。2つの平面が2つのメッシュ間のギャップでモデル化される場合、インターフェースタイプ7を用いた方が良いと言えます。2つの平面がギャップ無しでモデル化されている場合、インターフェースタイプ3は良い選択です。

非対称インターフェース (/INTER/TYP5)

このインターフェースは、メインサーフェスと、セカンダリ節点のリストとの間の衝撃をシミュレーションするために使用されます。

インターフェースには向きがあり、メインセグメントの1つの側からの接触のみが可能です。したがって、メインセグメントはセカンダリ節点の側を向いている必要があります。

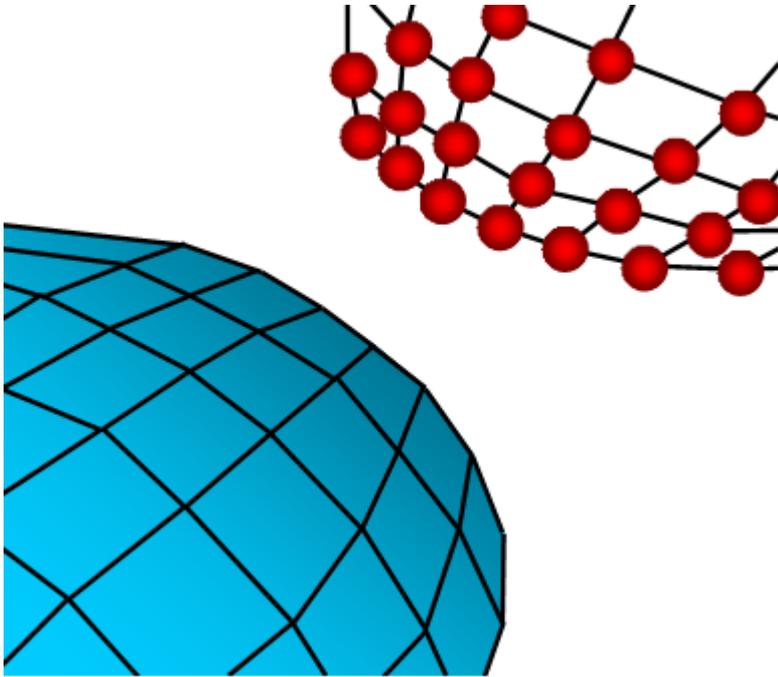


図 323: インターフェースTYPE5

メインサーフェスは規則的で良好なアスペクト比である必要があります。セカンダリ節点をメインサーフェスに入れることはできません。ソリッドに結合されたセグメントまたはシェル要素のみに働きます。このインターフェースの利用法の1つは剛壁の置き換えです。剛壁をインターフェースタイプ5に置き換えることにより、剛体の衝突をシミュレートすることが可能になります。

インターフェースタイプ 5で、ギャップを節点とサーフェス間の接触の判定に用いることができます。ギャップはユーザー定義で、サーフェスの面の法線方向に位置します。小さいか0ギャップの使用を推奨します。

接触が検知されると、弾性スプリングが追加され、スプリングの剛性は、メインセグメントのみの材料および幾何プロパティを用いて計算されます。安定性の理由から、剛性のスケールファクターとして0.2がメイン側の剛性に与えられます。この係数はメイン側がセカンダリ側に比べて非常に柔らかい場合を除いて修正しないことが強く推奨されます。このケースでは、弾性係数の小さいものに対して大きい弾性係数比をスケールファクタとして用いることが推奨されます。

上に述べたように、剛性は幾何学的特性と材料特性に加え、要素のタイプにも依存します。図 324 には、セグメントにつながる要素のタイプによる剛性計算の方法を記述しています。セグメントがソリッドとシェルで共通(例えば: 3Dパートが表皮で覆われている)の場合、剛性にはシェル要素に関係するものが用いられます。

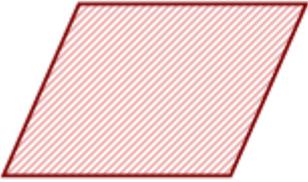
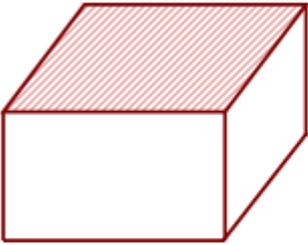
ELEMENT	STIFFNESS
	$K = s \frac{Et}{2}$ $\left\{ \begin{array}{l} E: \text{Young's modulus} \\ t: \text{shell thickness} \end{array} \right.$
	$K = s \frac{BA^2}{2V}$ $\left\{ \begin{array}{l} B: \text{Bulk modulus} \\ A: \text{Segment area} \\ V: \text{Element volume} \end{array} \right.$
	$K = sE\sqrt{S}$ $\left\{ \begin{array}{l} E: \text{Young's modulus} \\ S: \text{Section area} \end{array} \right.$
	$K = \max(K_t) \quad K_t : \text{translational stiffness}$

図 324: インターフェースタイプ5の剛性

インターフェースタイプ5の主な欠点は接触をメインセグメントの両側では起こせないことです。大回転のある問題(通常、衝突解析の場合)では、接触がサーフェスの間違った側で起こることがあり、そのため貫通が検知されないことになります。その結果として、複雑な接触問題では、サーフェスの法線を正しく定義するためには衝突への深い理解が必要になります。

もうひとつの重大な欠点は、節点がセカンダリ節点とメインセグメントの両方になることはできないことです。つまり、インターフェースタイプ5を通して、自動接触をシミュレートすることはできません。

インターフェースタイプ3と5における共通の問題

インターフェースタイプ3と5にはいくつかの共通した問題があります。

- エネルギージャンプ
- 悪い接触の取り扱い
- 制限された探索アルゴリズム

エネルギージャンプ

インターフェースタイプ5(およびタイプ3)に用いられるギャップは1方向で、エッジが考慮されません。これは特にギャップが大きい場合、エネルギーのジャンプを引き起こし得ます(図 325)。

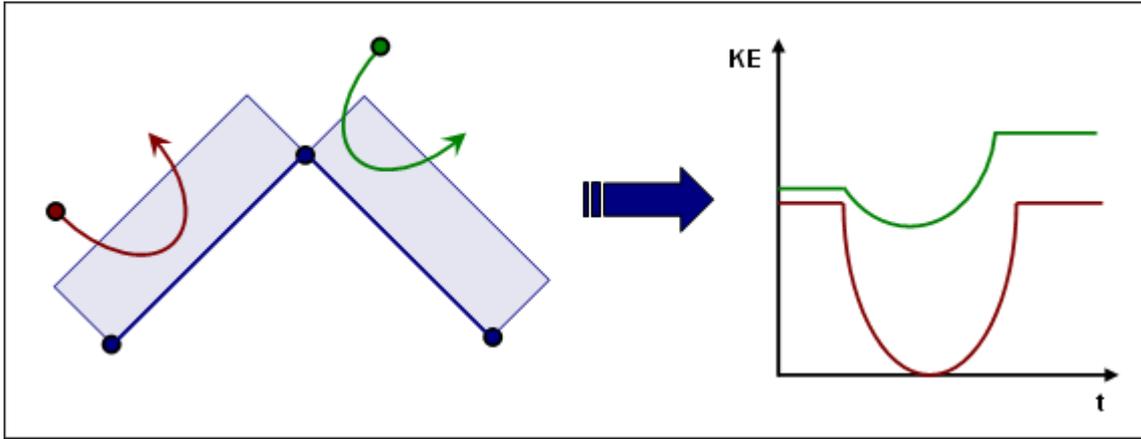


図 325: エネルギーのジャンプ

悪い接触の取り扱い

加えて、インターフェース剛性は一定で、節点の貫通が可能です。この点は、特に貫通時に滑りが起きる場合、非常に大きな誤差を生む可能性があります。図 326 は、不適切な接触の取り扱いのために、セカンダリ節点がどのようにシェルの中立面を超えてしまうかを示しています。

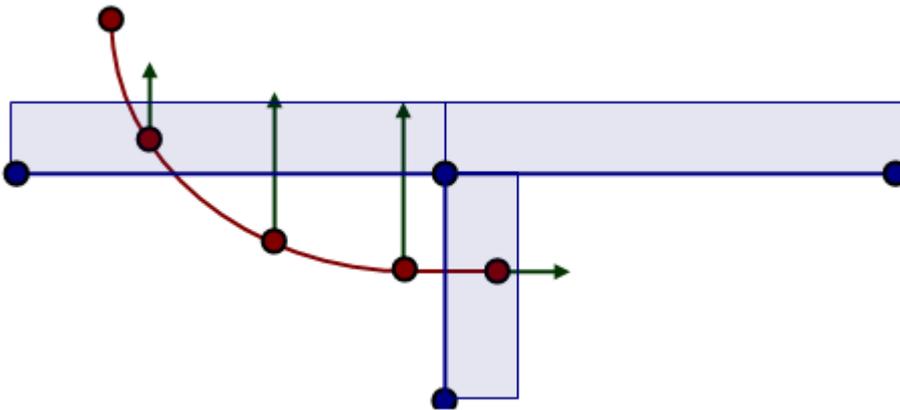


図 326: 悪い接触の取り扱い

制限された探索アルゴリズム

インターフェースタイプ5(およびタイプ3)では、最も近いメイン節点の探索は、前の節点にトポロジ的に近接したセグメントに制限されています(トポロジ的に制限された探索アルゴリズム)。初期状態において最も近いメイン節点を決めるための最初の探索がRadioss Starterで行われると、次のEngineでは前の節点にトポロジ的に近いセグメントのみを考慮して最も近いメイン節点が決まります。この方法は、CPU時間的にむしろ遅いですが、特に高い曲率が含まれる場合、うまく働きません(図 327)。

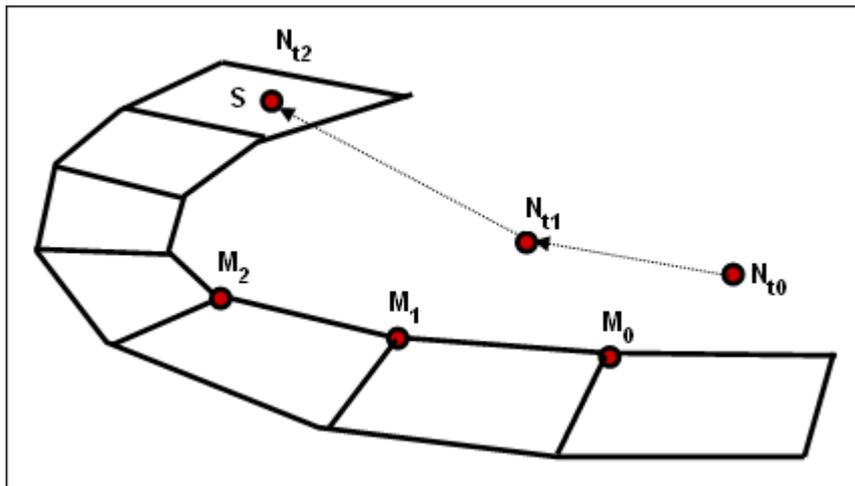


図 327: 最も近いメインセグメントの間違った検知

インターフェースタイプ 6 (/INTER/TYPE6)

インターフェースタイプ6は、2つの剛体間の接触のシミュレートに用いられます。

このインターフェースは、その剛性を除いてタイプ3と同様です。貫通と接触力との関係はユーザー定義の関数で与えられます。この接触は特に乗員拘束シミュレーション、たとえばニーボルスターなどに用いられます。このインターフェースの主な制限は、サーフェス1およびサーフェス2の両方が1つの剛体のパートでなければならない点です。加えて、両方のサーフェスとその法線が互いに向かい合う様に向いている必要があります。

用いられる剛性は力 - 貫通曲線(ユーザー入力)に一致します。瞬間的なインターフェース剛性は与えられた貫通での入力曲線の勾配になります。これにより、インターフェース剛性が安定時間ステップの計算に用いられるためにその時間ステップがその影響を受けます:

$$\Delta t = 0.1 \sqrt{\frac{M}{K}} \quad (215)$$

ここで、

M 最小値(最初の剛体の質量および2つ目の剛体の質量)

K 力対貫通曲線の勾配

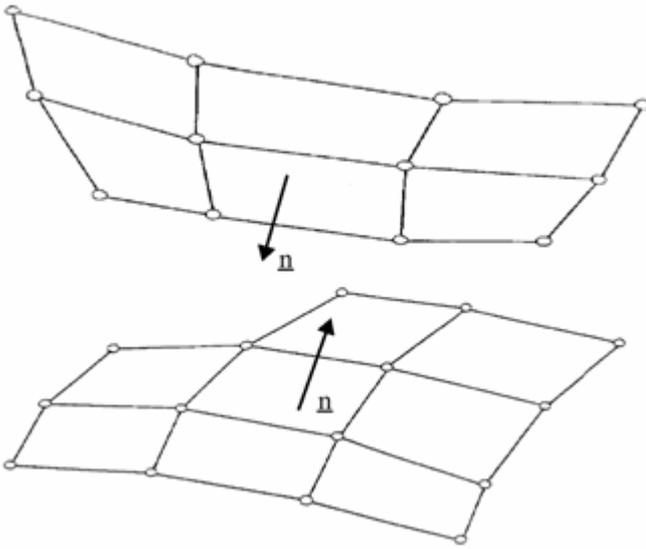


図 328: インターフェースタイプ6 - 法線の向き

汎用インターフェース(/INTER/TYPE7)

インターフェースタイプ7は汎用のインターフェースで、メインサーフェスと節点のセットの間の全てのタイプの接触をシミュレートすることができます。インターフェースタイプ3と5とは異なり、インターフェースタイプ7には向きが無く、セカンダリ節点がメインサーフェスに属することもできます。これにより、このインターフェースは自動接触をシミュレートすることができ、特に高速衝突の間の座屈をシミュレートできます。

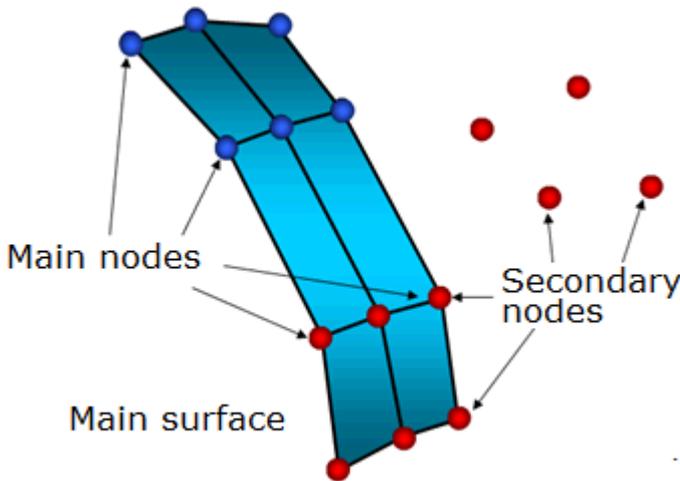


図 329: インターフェースTYPE7

インターフェースTYPE7は、インターフェースTYPE3とTYPE5で発生する全ての問題および制限を解決します。最も近いセグメントの探索は直接探索アルゴリズムを使用して行われるため、探索の制限はなく、全ての可能な接触が検出されます。エネルギージャンプを誘発するシェルエッジからの節点の接触は、エッジ周りの円筒形ギャップの使用により除去されます。

インターフェースTYPE7の主な利点は、剛性が一定ではなく、貫通に対して増加して節点のシェルの中立面の突き抜けを防止します。これにより、(インターフェースタイプ3または5のどちらかを用了時に共通の)悪い接触の取り扱いを解決できます。

インターフェースタイプ7で用いられているギャップは、これまでのインターフェースのものとは異なります。ギャップはシェルの中立面の両面に用いられ、エッジの周りに円筒形のギャップが追加されます(図 330)。ギャップはシェルの中立面の両面に用いられ、エッジの周りに円筒形のギャップが追加されます()。

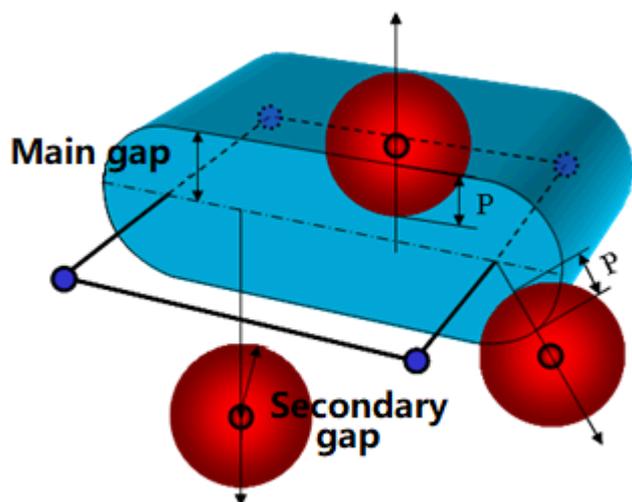


図 330: インターフェースTYPE7のギャップ

円筒ギャップはエネルギージャンプを取り除くことを可能にし、エッジから接触する節点は貫通時と貫通除去時で同じ経路に従います。加えて、このようなギャップはセグメント間のスライドの間、滑らかな反力を保ちます。

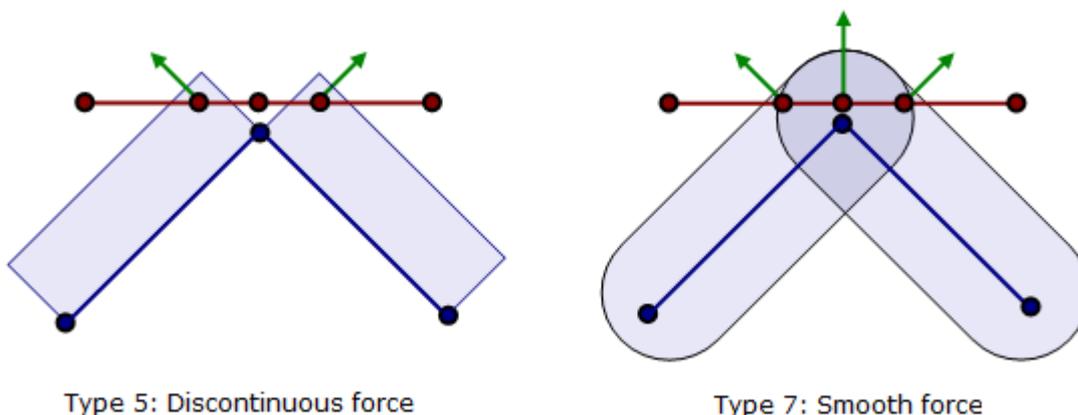


図 331: セグメント間のスライド

インターフェースTYPE3とTYPE5とは異なり、空間内の可変ギャップが可能です。オプション $I_{gap}GAP$ によって、可変ギャップは各衝撃についてメイン要素ギャップ(g_m)とセカンダリ節点ギャップ(g_s)の合計として計算されます。

$I_{gap}GAP = 1$ の場合、可変ギャップは次のように計算されます:

$$\max\left[Gap_{\min}, (g_s + g_m)\right] \quad (216)$$

$I_{gap}GAP = 2$ の場合、可変ギャップは次のように計算されます:

$$\max\left\{Gap_{\min}, \min\left[Fscale_{gap} \cdot (g_s + g_m), Gap_{\max}\right]\right\} \quad (217)$$

$I_{gap}GAP = 3$ の場合、可変ギャップは次のように計算されます：

$$\max\left\{Gap_{min}, \min\left[Fscale_{gap} \cdot (g_s + g_m), \%mesh_size \cdot (g_{s_l} + g_{m_l}), Gap_{max}\right]\right\} \quad (218)$$

表 22: 可変ギャップの計算

要素	メイン要素ギャップ (g_m)	セカンダリ節点ギャップ (g_s)
SHELL	$g_m = \frac{t}{2}$ t: メインセグメントの板厚	$g_s = \frac{t}{2}$ t: セカンダリ節点に結合されている シェル要素の最大板厚
BRICK	$g_m = 0$	$g_s = 0$
トラスとビーム	適用不可	$g_s = \frac{1}{2}\sqrt{S}$ S: 断面積

接触アクティブ化の最小ギャップ ($Gap_{min}min$) も用いられた場合、計算されるギャップは最小ギャップより小さくはなれません。ギャップに対してスケールファクターを与え、最小ギャップを定義することが可能です。

初期貫通

FEモデルでは初期貫通は非常に一般的で、メッシングプロセスの間の離散化の結果として避けられません(図 332)。

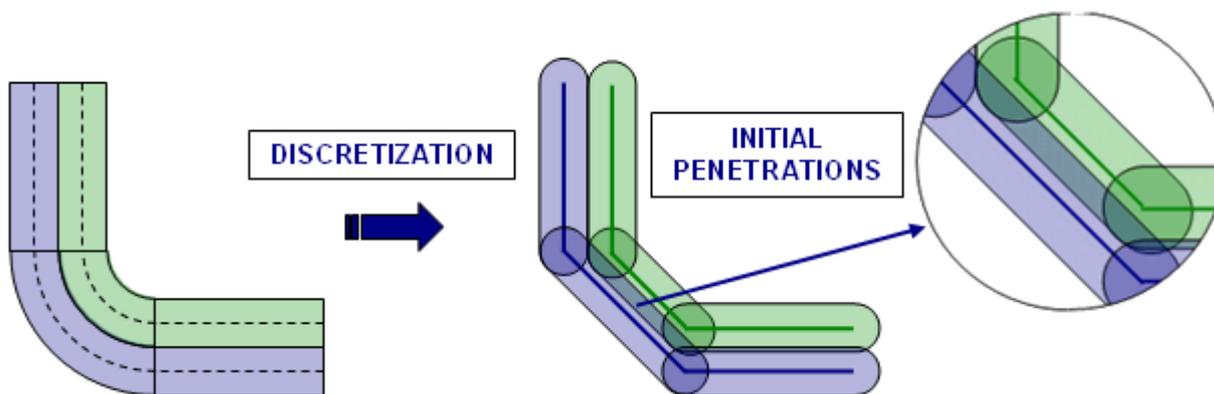


図 332: 離散化による初期貫通

InactiINACTI

InactiINACTIフラグの利用を通して特別な初期貫通を取り扱うことができます。貫通している節点をインターフェースから取り除くか、貫通している節点に関連するメインセグメントを取り除くことができます。どちらの方法も非常に簡単に初期貫通を取り除くことができますが、貫通の数が多い場合は良くない結果を引き起こす可能性があります。

*InactiINACTI*を3に設定すると、初期貫通を回避するために、Radioss Starterは貫通されている節点の座標値を自動的に修正します。これを行う場合には、この操作が初期状態で拘束されたスプリングを生み出す可能性もあるため、特別な注意が必要です。

*InactiINACTI*を5に設定することにより、時間内での可変ギャップを得ることもできます。図 333は、以前の貫通を考慮してどのように有効なギャップが更新されるかを示しています。

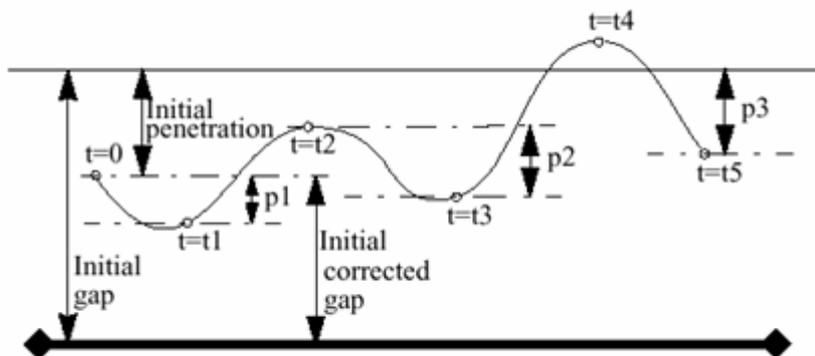


図 333: 時間内での可変ギャップ

$t=0$ で節点が初期貫通を起こしている場合、そのギャップは自動的に修正されます。次に、この“初期修正ギャップ”は節点がメインセグメントから離れるように常に増加されます。このオプションは主としてエアバッグの展開に用いられ、節点が全て深く貫通している展開の開始時にも正常な時間ステップを得ることを可能にします。

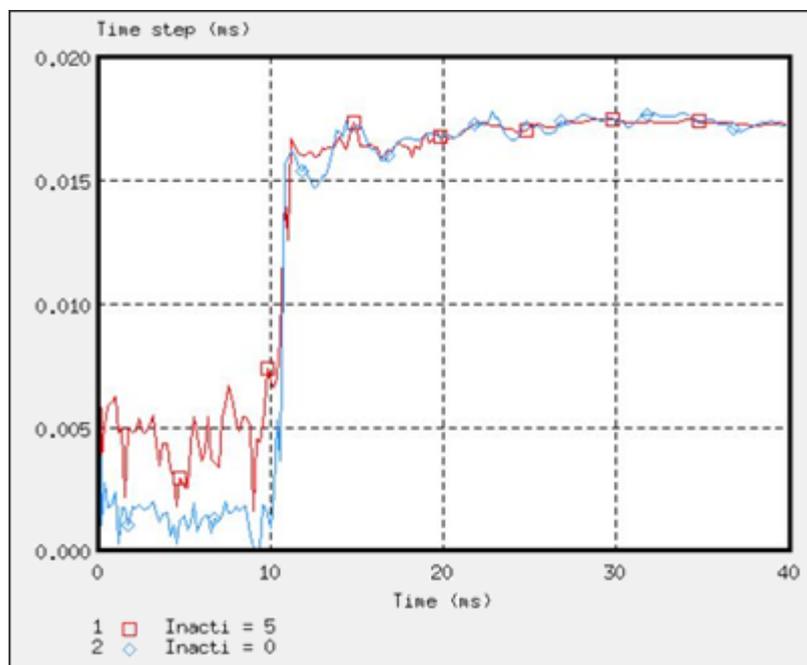


図 334: *InactiINACTI*=5を用いた時間ステップ

高周波数への影響を防ぐために、*InactiINACTI* = 5の代わりに*InactiINACTI* = 6を使用することを推奨します。

Fpenmax

Fpenmax(初期貫通の最大率)は、大きな初期貫通に対応するために使用します。InactiINACTIの値にかかわらず、Penetration ≥ Fpenmax · Gapの場合、節点の剛性は非アクティブになります。

Igap3 + %mesh_size

IgapGAP= 3の場合、初期貫通を回避するためにメッシュのサイズを考慮に入れることができます。この場合、可変ギャップは下記のように計算されます：

$$\max\left\{Gap_{\min}, \min\left[Fscale_{gap} \cdot (g_s + g_m), \%mesh_size \cdot (g_{s_l} + g_{m_l}), Gap_{\max}\right]\right\} \quad (219)$$

ここで、

g_{m_l} 要素の短いエッジの長さ

g_{s_l} セカンダリ要素に結合された要素の短いエッジ長さ

Irem_gap

オプションIrem_gapは、要素に近い(Curvilinear Distance < $\sqrt{2} \cdot Gap$)セカンダリ節点を非アクティブ化するために使用します。このオプションは、メッシュサイズが非常に小さい場合の自己接触に有用です。

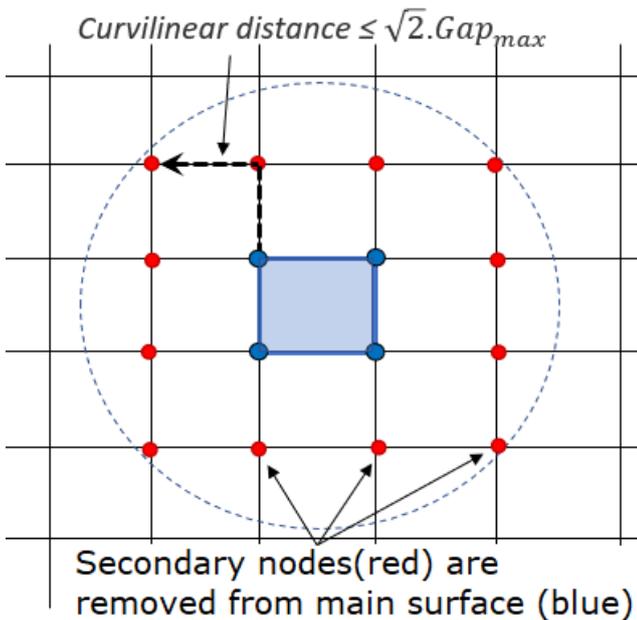


図 335: -1: Irem_gap定義

注： 初期貫通を取り扱う際、HyperMeshやHyperCrashの貫通除去のようなプリプロセッシングツールを用いてFEモデル生成時に初期貫通を除去することを強く推奨します。

インターフェース剛性

他のインターフェースタイプと同様にペナルティ法が用いられる場合、インターフェースはギャップを貫通するセカンダリ節点に対してスプリング剛性を持ちますが、その反力はずっと良い近似で計算されます。その節点の貫通に対する力は、剛性の増加により非線形です。

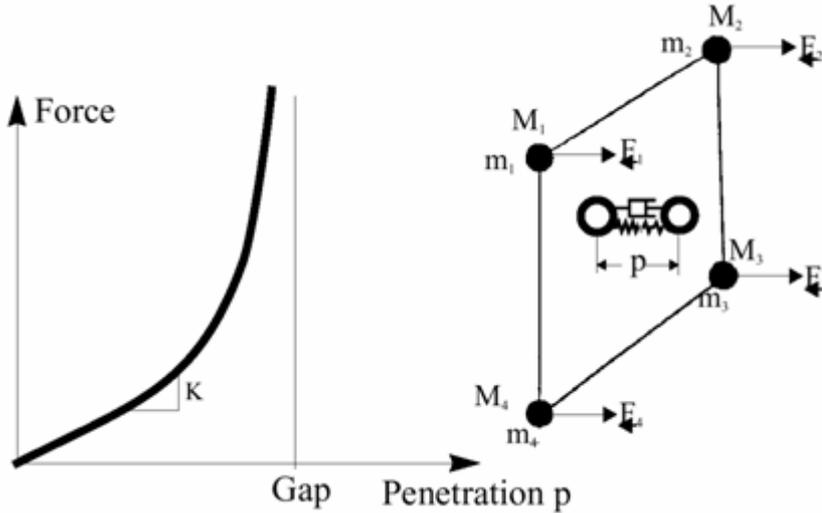


図 336: インターフェースタイプ7でのインターフェース力の変化

インターフェース剛性(K)は一定ではなく、貫通に伴って増加します。加えて、貫通の速度に粘性減衰が作用します。接触力は次のように計算されます:

$$F_n = K_S P + C \frac{dP}{dt} \left\{ \begin{array}{l} K_S = K_0 \frac{Gap}{Gap - P} \\ C = VIS_S \sqrt{2K_S M} \end{array} \right. \quad (220)$$

接触力は次のように計算されます:

$$K_t = \frac{\partial F}{\partial P} = K_0 \frac{Gap^2}{(Gap - P)^2} \quad (221)$$

貫通が大きい場合、節点時間ステップに重大な影響を与えます。節点時間ステップの計算に用いられる剛性はインターフェース剛性を考慮します。

インターフェース剛性を減少させるには2つの方法があります:

- ギャップの増加
- 初期剛性の(フラグ $StfacSTFAC$ の使用を介した)増加

両方の方法とも接触によるエネルギーをより多く吸収し、接触をスムーズにすることができます。ギャップの増加はより多くの距離で節点を減速させることを可能にし、貫通は減少します。

コメント

1. シミュレーションに要素時間ステップが選択された場合でも、インターフェースTYPE 7がある場合、節点時間ステップが自動的に計算されます。そして最も小さい時間がシミュレーションに使われます。
2. インターフェースTYPE 5とは逆に、1.0より小さい $StfacSTFAC$ は最初の接触時に多くの貫通を作り出し、結果として高いインターフェース剛性と反力を生み出します。高い貫通を避けるため、 $StfacSTFAC$ は1.0以上とすることが推奨されます。

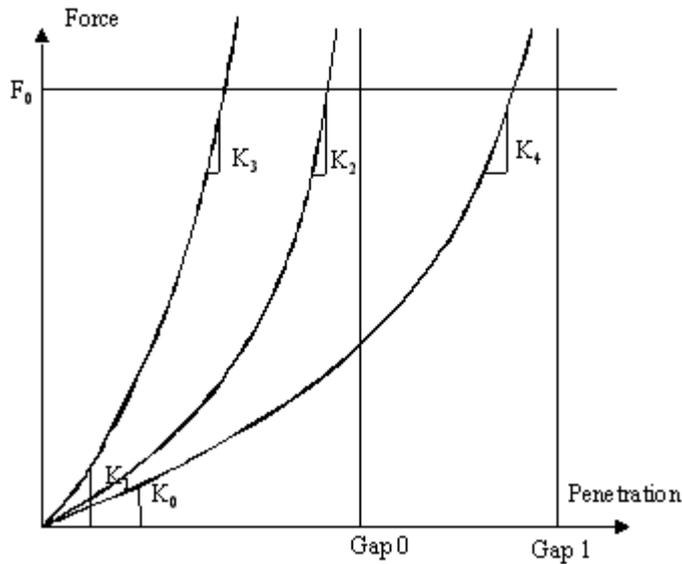


図 337: カ - 貫通曲線

初期剛性の増加は、貫通初期の小さな時間ステップを引き起こしますが、貫通が大きくなった場合の時間ステップが増加します。

摩擦

Radiossではいくつかの摩擦定式化が利用可能です。最も単純なものは、最も広く用いられているもので、Coulomb摩擦則です。この定式化は衝突解析で精度のよい結果を与え、1つのパラメータ(Coulomb摩擦係数、 μ)だけを必要とします。

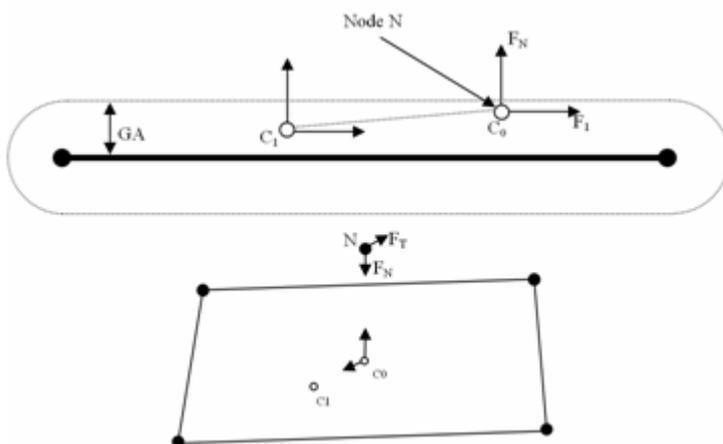


図 338: 節点に作用する鉛直力と接線力

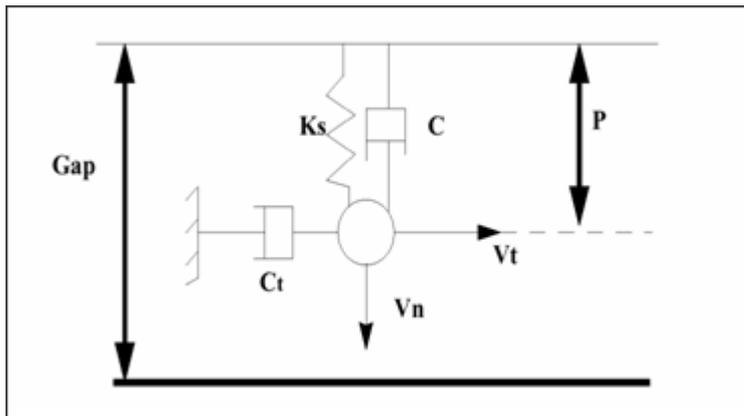


図 339: 粘着力の計算

μ のデフォルト値は0(サーフェス間の摩擦なし)です。摩擦力の計算では、デフォルトの摩擦ペナルティ定式化は接線速度に基づいた粘性定式化です。スライディングの間貫通した節点は位置C0(時刻tの接触位置)からC1(時刻t + Δt の接触位置)に移動します。接触は粘性型であるため、粘性係数Cが粘着力の計算に導入されます:

$$F_{adh} = C \cdot V_t \tag{222}$$

ここで、

$$C = VIS_F \cdot \sqrt{2KM}$$

- K** 瞬間的なインターフェース剛性
- VIS_F** インターフェース摩擦の臨界減衰係数
- M** メイン節点の質量

粘着力(F_n)が計算された際、それが μF_n より小さい場合、摩擦力 F_t に等しいままで変更されず、固着が起きます。粘着力が μF_n より大きい場合、摩擦力が低下し、 μF_n と等しくなります。

$$F_t = \min(\mu F_n, F_{adh}) \tag{223}$$

$F_t = \min(\mu F_n, F_{adh})$

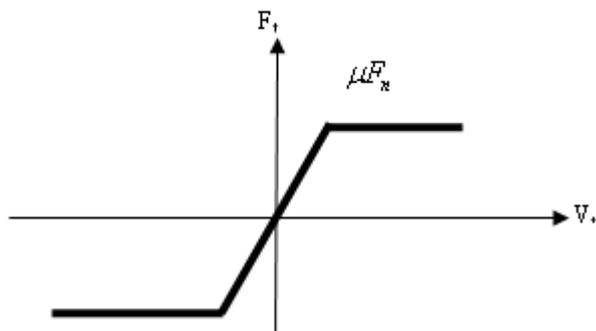


図 340: 摩擦力の計算

スライディングが非常に低い速度で発生すると(例えば準静的シミュレーション)、摩擦力は接線速度に基づいて計算されるため、粘性定式化は機能しません。この制限を克服するため、接線変位に基づく新しい摩擦ペナルティ定式化(剛性増分定式化)が利用可能です。この方法では人工的な剛性*K*が摩擦力の変化を計算するために導入されます:

$$\Delta F_t = K \cdot V_t \cdot \delta_t \tag{224}$$

ここで、

δ_t 接線変位

そのため、前の定式化とは異なり、剛性定式化では、低速であっても正しい摩擦力を計算できます。図 341 がこの点を示しています。強制変位がパート(3D 立方体)に低速で(0.01 m/s)作用した場合、粘性定式化はうまく働きませんが、接線変位に基づく剛性定式化ではうまくいきます。

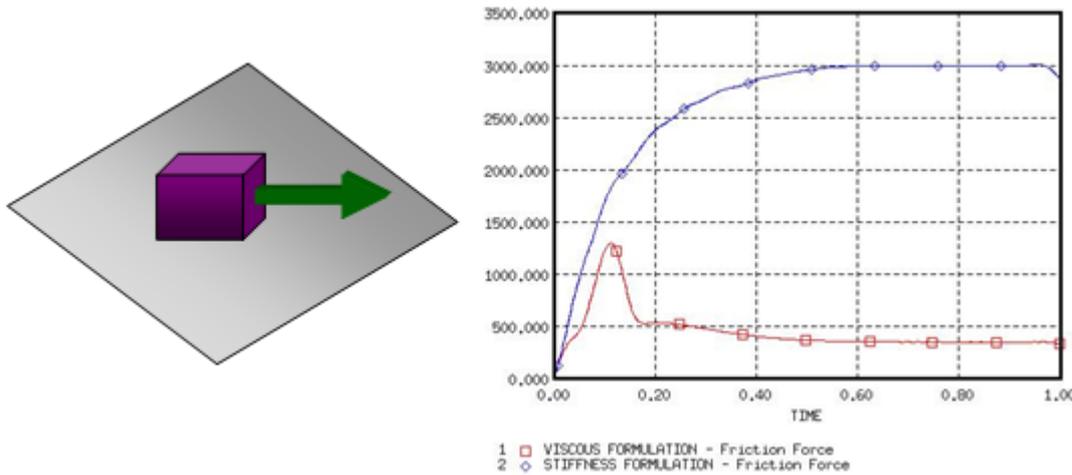


図 341: 粘性定式化対剛性定式化

他の摩擦定式化も利用可能で、その原理はCoulomb摩擦則と同様です。Radiossでは、まず粘着力が計算され、それが次に μF_n と比較されます。その違いは摩擦係数(μ)にあり、それらは最早一定ではなく、メインセグメントの法線方向力の圧力と、セカンダリ節点の接線速度の関数となります。フラグ $I_{fric}FRIC$ により、3つの新しい定式化が利用可能です:

一般化粘性摩擦則:

$$\mu = Fric + C_1 p + C_2 \cdot V + C_3 p \cdot V + C_4 \cdot p^2 + C_5 \cdot V^2 \tag{225}$$

修正Darmstad摩擦則:

$$\mu = Fric + C_1 \cdot e^{(C_2 V)} \cdot p^2 + C_3 \cdot e^{(C_4 V)} \cdot p + C_5 \cdot e^{(C_6 V)} \tag{226}$$

Renard摩擦則:

$$\mu = C_1 + (C_3 - C_1) \cdot \frac{V}{C_5} \cdot \left(2 - \frac{V}{C_5}\right) \tag{227}$$

の、

$$V \in [C_5, C_6] \tag{228}$$

$$\mu = C_3 - \left((C_3 - C_4) \cdot \left(\frac{V - C_5}{C_6 - C_5} \right)^2 \cdot \left(3 - 2 \cdot \frac{V - C_5}{C_6 - C_5} \right) \right) \tag{229}$$

の、

$$V \in [C_5, C_6] \quad (230)$$

$$\mu = C_2 - \frac{1}{\frac{1}{C_2 - C_4} + (V - C_6)^2} \quad (231)$$

の、

$$V \geq C_6 \quad (232)$$

$$P = C_1 \cdot \mu + C_4 \cdot \rho \cdot C_v \cdot T = C_1 \cdot \mu + \alpha_0 \cdot T \quad (233)$$

 注：全ての摩擦定式化に摩擦のフィルタリングが利用可能で摩擦力をスムーズにすることができます。詳細については、RadiossStarter入力をご参照ください。

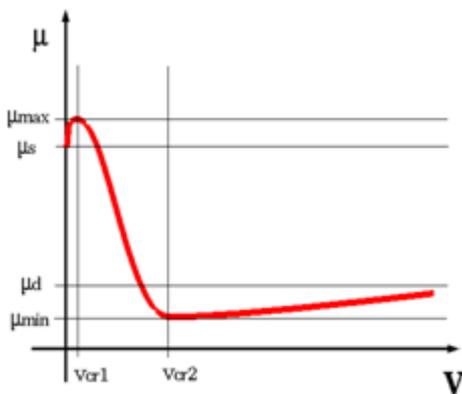


図 342: Renard摩擦モデルのグラフィカルな表現

熱交換

インターフェースタイプ7には3つの熱交換があります。熱伝導、熱放射および熱摩擦は、 $I_{theTHE}=1$ により可能になります。

I_{form_the1} によるセカンダリとメイン間の熱伝導では、2つの異なる熱伝導を定義できます。一方はインターフェースで一定温度が設定され、熱交換はこのインターフェースとシェルセカンダリ側との間でのみ行われます。もう一方では、接触している全ての部分間で熱交換が行われます。

$F_{rad} \neq 0$ の場合、放射は距離 D_{rad} （放射計算のための最大距離）内で計算されます。 D_{rad} の値は高く設定しすぎないことを推奨します。高すぎると、Radioss Engineのパフォーマンスが低下する可能性があります。

F_{heat_s} および F_{heat_m} 摩擦を使用して、スライディングエネルギーが熱に変換されます。摩擦熱はセカンダリ側とメイン側に分散されるため、一般的には、 $F_{heat_s} + F_{heat_m} < 1.0$ となります。摩擦熱 Q_{Fric} は、以下のように定義されます：

$I_{formFORM}=2$ の場合（剛性定式化）：

セカンダリ側：

$$Q_{Fric} = F_{heat_s} \cdot \frac{(F_{adh} - F_t)}{K} \cdot F_t \quad (234)$$

メイン側：

$$Q_{Fric} = F_{heat_m} \cdot \frac{(F_{adh} - F_t)}{K} \cdot F_t \quad (235)$$

(Ithe_form=1)

ここで、Kは接触剛性、 F_{adh} は粘着力です。

I_{form} FORM=1の場合(ペナルティ定式化):

セカンダリ側:

$$Q_{Fric} = F_{heat_s} \cdot C \cdot V_t^2 \cdot dt \quad (236)$$

メイン側:

$$Q_{Fric} = F_{heat_m} \cdot C \cdot V_t^2 \cdot dt \quad (237)$$

インターフェース時間ステップコントロール

前のセクションで接触の間全ての貫通した節点に剛性が付加されるために時間ステップが非常に減少する可能性があることを説明しました。加えて、どの節点も1サイクルの間にメインセグメントを通過することを防ぐため、運動学的時間ステップも計算されます。節点の衝突速度が1サイクルでセグメントを通過するほど速い場合、節点がギャップ距離の間にいる時にペナルティ力を付加できるように、Radiossは時間ステップを減少します。 p が貫通距離の場合、 dp/dt が貫通速度で、運動学的時間ステップは、節点が節点とセグメントの間の半分の距離を進むのに必要な時間となります。節点時間ステップは数値安性を保証するためにも計算されます。そして最も小さい時間ステップがシミュレーションに用いられます。

接触中の節点時間ステップ:

$$dt_{nodal} = \sqrt{\frac{2M_{nodal}}{\sum(K_{interface} + K_{element})}} \quad (238)$$

運動時間ステップ:

$$dt_{kin} = \frac{1}{2} \left[\frac{Gap - p}{dp/dt} \right] \quad (239)$$

 注: 自動車衝突シミュレーションの衝突速度に関しては、運動学的時間ステップはアクティブになり得ません。そのアクティブ化はモデルの矛盾による可能性があります。

何らかの理由で節点が深く貫通した場合、節点時間ステップまたは運動時間ステップのどちらかが非常に小さくなります。そこで、Engineファイルのオプション /DT/INTER/DELを用いてこの節点をインターフェースから切り離すことが可能です。 dt_{min} に到達した全ての節点はインターフェースから除去されます。

 注: このオプションは接触の間に正常な時間ステップを維持するのに有用ですが、切り離される節点の数が多くなりすぎると良くない結果を生むことが予想されます。Engine出力ファイルに表示される次のメッセージに注意を払う必要があります:

```
**WARNING MINIMUM TIME STEP XXX IN INTERFACE 1
REMOVE SECONDARY NODE XXX FROM INTERFACE
```

質量の巨大な増加

マススケーリング (オプション/DT/NODA/CST)は質量の不安定を引き起こすことがあります。節点が貫通すると、その全体剛性が増加し(瞬間的なインターフェース剛性 K_t が付加される)、そのため時間ステップが減少します。最小時間ステップに合わせるため、Radiossは必要な質量を節点に付加します。悪いことに、この付加された質量は運動エネルギーを増大させ、貫通はさらに大きくなり得ます。

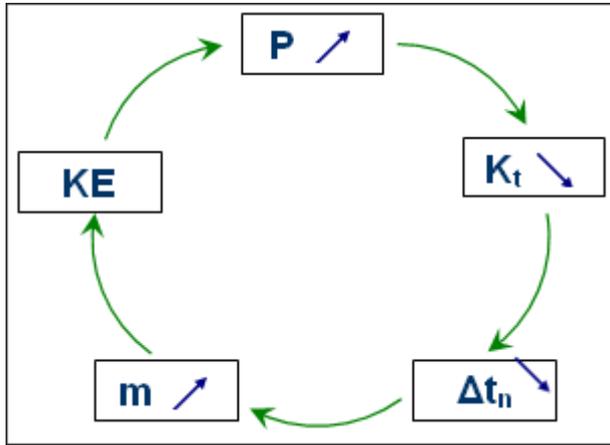


図 343: インターフェースタイプにおけるマススケーリングの効果

インターフェースが貫通を止めることができない場合、追加される質量は(マススケーリングのために)増加を続けます。このため、質量変化が直ちに(数サイクルで)巨大となり、計算が止まることがあります。このような場合、インターフェースを修正する必要があります:

- ギャップを増やします
- 初期剛性を増加することもできます
- 接触域でメッシュは一様で細くなるように修正します

硬いパートに対する柔らかいパート

Radiossで計算されるデフォルトの剛性は通常、時間ステップの落ち込みを引き起こす非常に高い貫通を避けるのに適しています。同様の材料の間で接触が生じる場合には、デフォルトの剛性の利用で問題はありませんが、材料が異なる場合は例外です。例えば、軟鋼が柔らかいフォームに衝突する場合、デフォルトの剛性は高い貫通を避けるためには低すぎる可能性があります。このような接触が起きることが予想される場合には、最初にメイン材料剛性分のセカンダリ材料剛性の比を計算しておくことを勧めます。この比が100よりも大きい場合、スケールファクター ($StfacSTFAC$)にこの比を用いてインターフェース剛性を増加させるべきです。

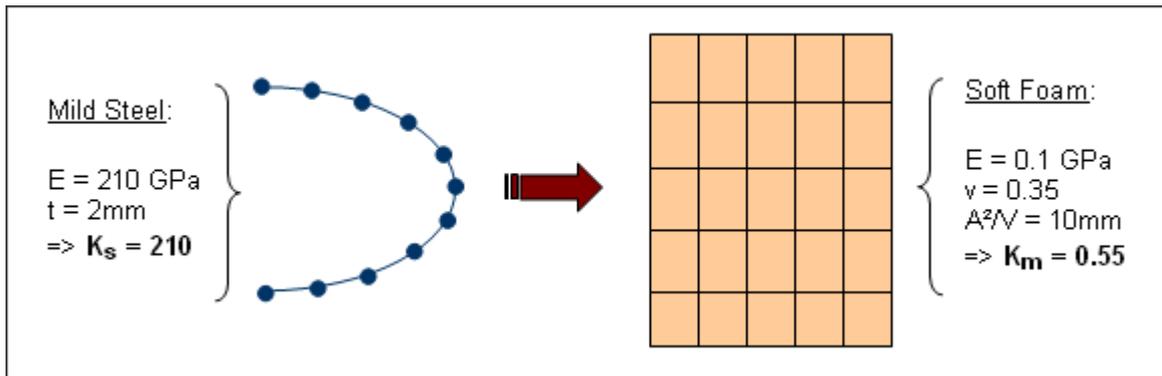


図 344: 鋼材とフォーム間の衝突

図 344 は、軟鋼と柔らかいフォームの接触を示します。剛性の比が380よりも大きい場合、メイン側を柔らかい側にし、フラグ *StfacSTFAC* を380に設定することで深い貫通を避けられるかもしれません。

エッジ間接触のロッキング

インターフェースタイプ7は、エッジとエッジの接触は扱いません。このインターフェースのエッジとエッジの接触の間の制限を図 345に示します。

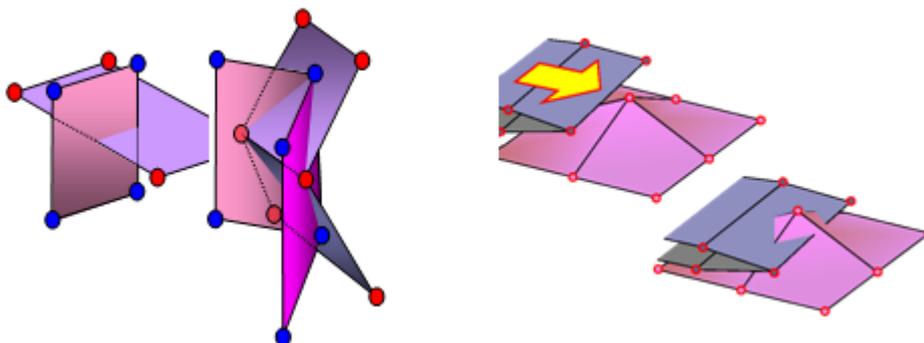


図 345: エッジ間の接触

メッシュが十分に細かい場合、エッジとエッジの貫通は節点のシェルへの接触へと続きます。エッジとエッジの接触の主な問題は、これがロッキング状態となることです。エッジ貫通の後に荷重変化がある場合、節点とサーフェスの接触が検知されるためにロッキングが避けられません(図 346)。これは通常高い貫通を引き起こします。これにより、時間ステップの減少により解析が止まることがあります。ロッキングが起きる場合、この部分にインターフェースタイプ11を用いて問題を解決することが必要になります。

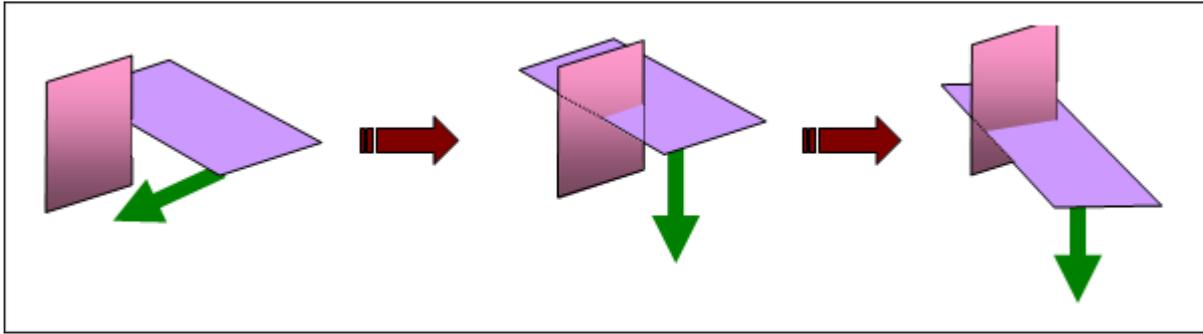


図 346: エッジ貫通後のロッキング

接線力の生成

貫通している節点が摩擦無しでスライドする場合でも接線力が生成されることがあります。この挙動は、エッジ周りでのギャップの重なりによって生じます。図 347 は、エッジ周りの円筒ギャップにより、力が最早シェルの中立面に鉛直にならないことを説明しています。

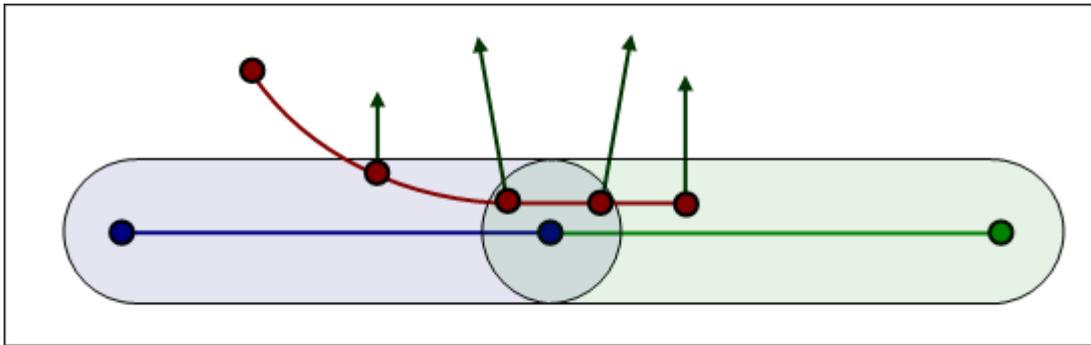


図 347: 接線力の生成

注: 衝突のシミュレーションではこれは問題になりませんが、摩擦が非常に重要な金属成形では、これが大きく精度を下げる可能性があります。

コメント

1. 常に接触力のポスト処理を行うことが推奨されます。これが大きすぎる場合、物理的な理解を考慮してモデルをチェックする必要があります。
2. 対称接触での力をポスト処理するために、接触は4つのインターフェースに分割する事ができます。例えば、AとBの2パートでは、以下を生成できます:
 - + AがメインでBがセカンダリのインターフェース1
 - AがセカンダリでBがメインのインターフェース2
 - + Aがメインとセカンダリのインターフェース3
 - + Bがメインとセカンダリのインターフェース4

自己接触のギャップワーニング

このワーニングは自己接触のインターフェースの場合には考慮する必要があります。

自動接触をシミュレートする際、最小ギャップには少なくとも最小セグメントのエッジの半分を用いる事をお勧めします。このメッセージはメイン側に少なくとも1つのギャップの2倍以下の側面の長さがあることを意味しており、過剰剛性の危険性があります。

```
WARNING ID: 94
** WARNING IN INTERFACE GAP
INPUT GAP 1.7
HOWEVER GAP IS RECOMMENDED TO BE LESS THAN 1
```

図 348 ギャップが要素の側面長さの半分に等しい自己接触インターフェースを示します。要素が50%以上圧縮されると、赤い節点が隣接する要素のギャップに入り、あるべきではない接触が検知されます。これは構造の過剰な剛性を引き起こします。

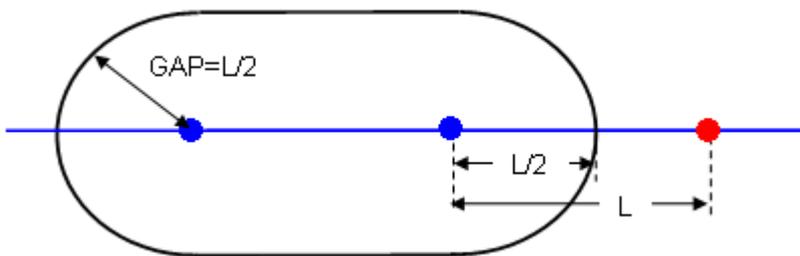


図 348: 自動接触モデル化の際に推奨されるギャップ

要素の側面の長さLがギャップよりも小さい場合、計算の開始時に接触が計算されることとなります。

このような状況は例外的な場合には許容されるかもしれませんが、そうでなく自己接触インターフェースが頻繁にある場合には許容できません。このメッセージの原因はプリプロセッサを用いて要素に長さの基準値を選択する事で特定できます。

破断

要素の破断がモデル化され、要素破壊が想定されている時、破壊する要素がメインセグメントまたはセカンダリ節点のどちらかで定義されているかが重要です。

要素が削除されたとき、対応するセグメントはなお考慮され、その節点はなお接触しているものとして計算されます。削除された要素は剛性を持たないため、この挙動は非常に大きな誤差を生む可能性があり、破壊が想定される場合はフラグ $I_{del}DEL$ を 2 にセットすることが強く推奨されます。このフラグは破壊された要素をメインサーフェスから除去し、対応する節点をセカンダリ節点リストからも除去します。

注: $I_{del}DEL$ フラグはRadioss V51からあります。これより古いバージョンについては、/DELINT/ONをご参照ください。

ドローブードインターフェース (/INTER/TYPES)

インターフェースタイプ8は、ドローブードのシミュレートに用いられます。このインターフェースは主に製造業の金属成形のモデル化に用いられます。絞りブードは金属帯板がスタンピングプロセスで滑るのを防ぐために用いられます。

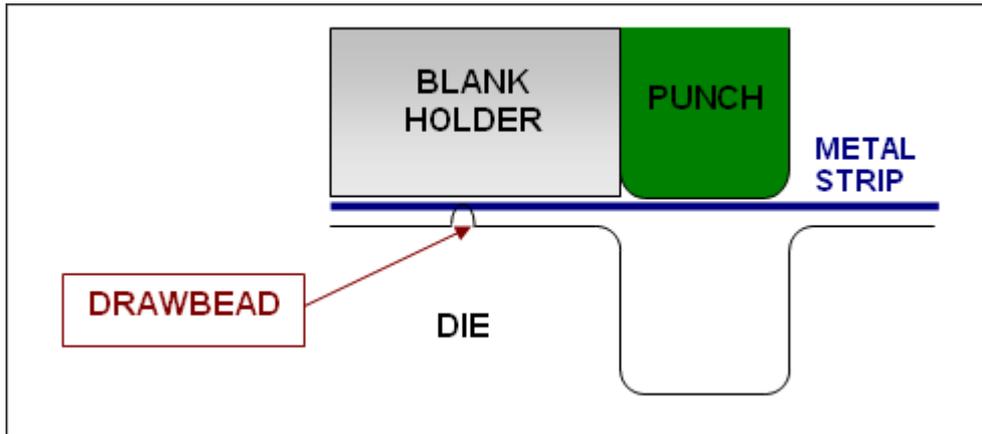


図 349: スタンピングプロセス

インターフェースタイプ8を用いたドロビードのモデル化は、セカンダリ節点の線とメインサーフェスの定義からなっています。セカンダリの節点は、入力力が単位長さ当たりとなるために、ソートされている必要があります。そしてその長さが連続する2節点間の距離として計算されます。セカンダリ節点がメインサーフェスに投影されるとすぐ、全てのメイン節点にその接線速度の反対の接線力が与えられます(図 350)。その結果、金属帯板は滑りません。

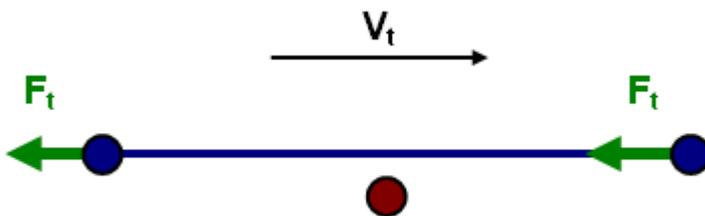


図 350: ドロビード力

注: メインサーフェスに作用する全体の力は、(ユーザー定義の)単位長さ当たりのドロビード力に連続する2つのセカンダリ節点間の距離を乗じたものを超えることができません。この場合、金属帯板の節点の滑りが生じます。

共通の問題

ドロビードが連続でない場合、それぞれの連続するドロビードに対して1つのインターフェースとなるように、複数のタイプ8のインターフェースを生成する必要があります。そうでないと、同じ連続するドロビードの部分ではない2つの節点間でドロビード力が高くなりすぎることがあります。

図 351 がこの点を示しています。灰色の部分は自動車のフードで、スタンピングプロセスで3のドロビードが必要になります。タイプ8のインターフェースが1つだけ生成されると、ドロビードは連続でなく、節点N17とN18の間の距離が2連続節点間の平均距離よりもずっと大きくなります。このため、節点 N17とN18に作用するドロビード力が高くなりすぎ、これらのエリアで非現実的な変形を引き起こし得ることになります。

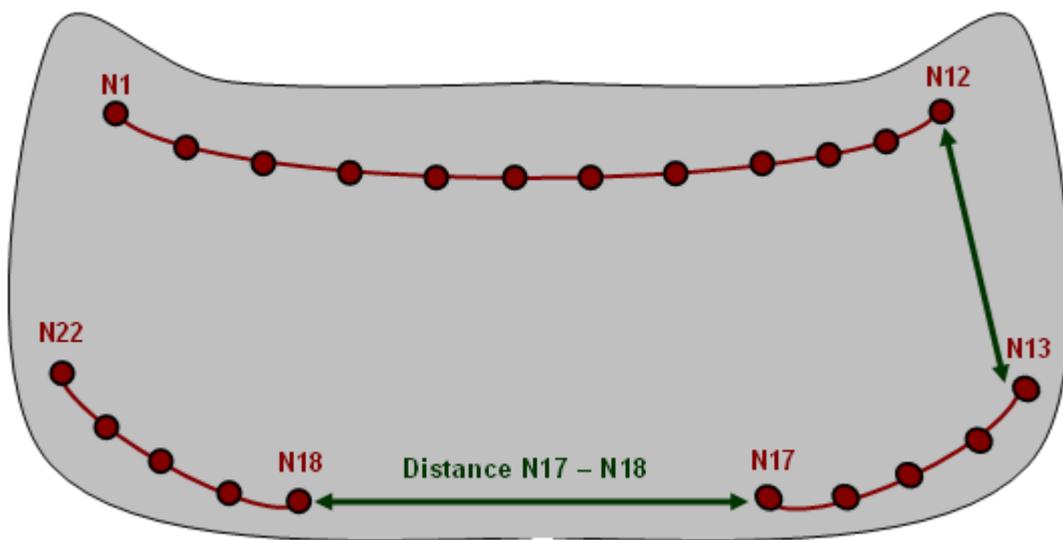


図 351: フードのスタンピングの例

エッジ間接触インターフェース (/INTER/TYPE11)

インターフェースタイプ11は1Dメッシュ、シェルおよびソリッドのエッジの間の線の接触をシミュレートするために用いられます。

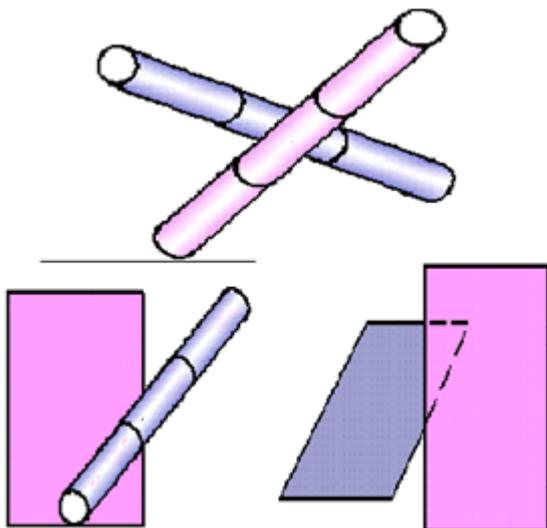


図 352: エッジ間の接触

タイプ11のインターフェースは、タイプ7のインターフェースと共に用いることでロックするケースを解くことができます。このインターフェースはタイプ7と同じペナルティ定式化および探索アルゴリズムを用いています。

インターフェースタイプ11は数学的には複雑なアルゴリズムを用いています、そのため、必要な場合のみ用いることを強く推奨します。巨大なインターフェースタイプ11は計算の速度低下を起し得ます。

2次曲面接触 (/INTER/LAGMUL/TYPE16 & /INTER/LAGMUL/TYPE17)

インターフェースTYPE16は、図 353に示したような対称接触の節点グループ(セカンダリ)と2次要素の曲面(メインパート)の間の接触条件を定義することができます。メインパートは、16節点厚肉シェルまたは20節点ソリッドによって構成することが可能です。Lagrange乗数法が作用する接触条件に用いられ、このため、ギャップを与える必要はありません。このインターフェースの適用分野の例は、ギアボックスのモデル化などのギャップのないスライディング接触が挙げられます。

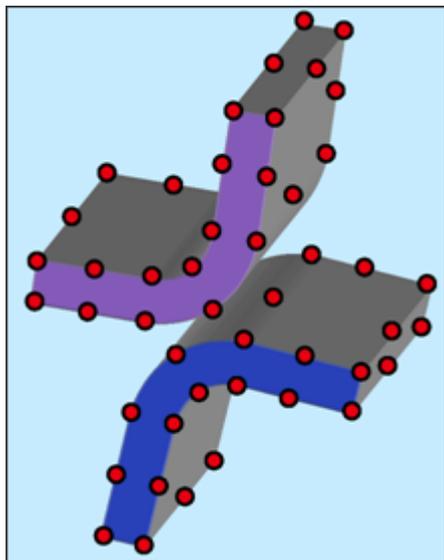


図 353: インターフェースTYPE16 - 節点と2次曲面の接触

インターフェースTYPE17では2次曲面間の接触をLagrange乗数法を用いてモデル化することができます。これは2つの2次曲面の接触を直接解くことができるTYPE16インターフェースの一般化形式です。この接触は滑り(摩擦なし)または固着をサポートしています。

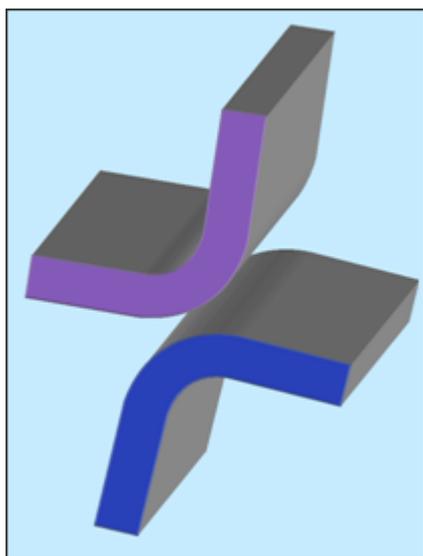


図 354: インターフェースTYPE17 - 2次曲面と2次曲面の接触

上で定義したように、両方のインターフェースは摩擦効果をモデル化できません。接触は固着または摩擦なし(完全すべり)として考慮されます。

注: Lagrange乗数法のインターフェースを用いる際は、接触の対称化は推奨できません。

タイドインターフェース(/INTER/TYPE10)

このインターフェースは、接触時の剛性が一定であることを除いて、インターフェースタイプ7と同様です。

加えて、接触後にセカンダリ節点は、メインサーフェスにリバウンドありまたはなし（フラグ I_{tied} ）で固着されます。

剛性

接触の間、セカンダリ節点を押し戻すため、一定の剛性と共に関質量のないスプリングが付加されます。加えて、セカンダリ節点を固着し、セカンダリ節点を接触点の近くに留めるために2番目の質量のないスプリングを使用します。リバウンドが許されるかどうかにより、これらの2つのスプリングはセカンダリ節点がこれ以上貫通しないように維持されます。

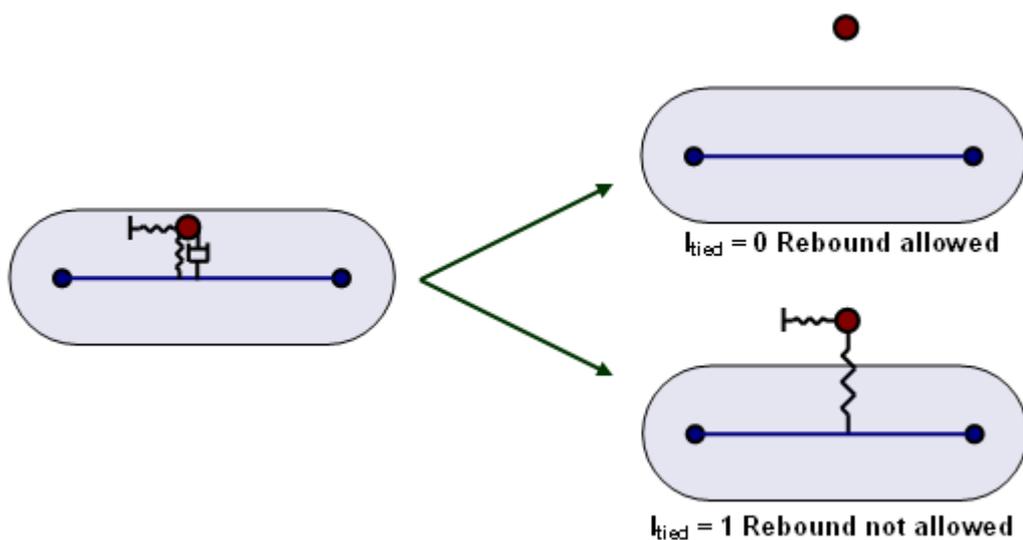


図 355: インターフェースタイプ10

See Also

[/INTER/TYPE10 \(Starter\)](#)

荷重

プレロード

要素の1つのセクションをプレロードする機能は、/PRELOADオプションを用いて使用できます。この機能は、アセンブリ内で使用されているボルトのプリテンション力をモデル化するために用いることができます。

ボルトテンショニング

ボルトテンショニング問題の物理的な詳細

典型的なシーケンス

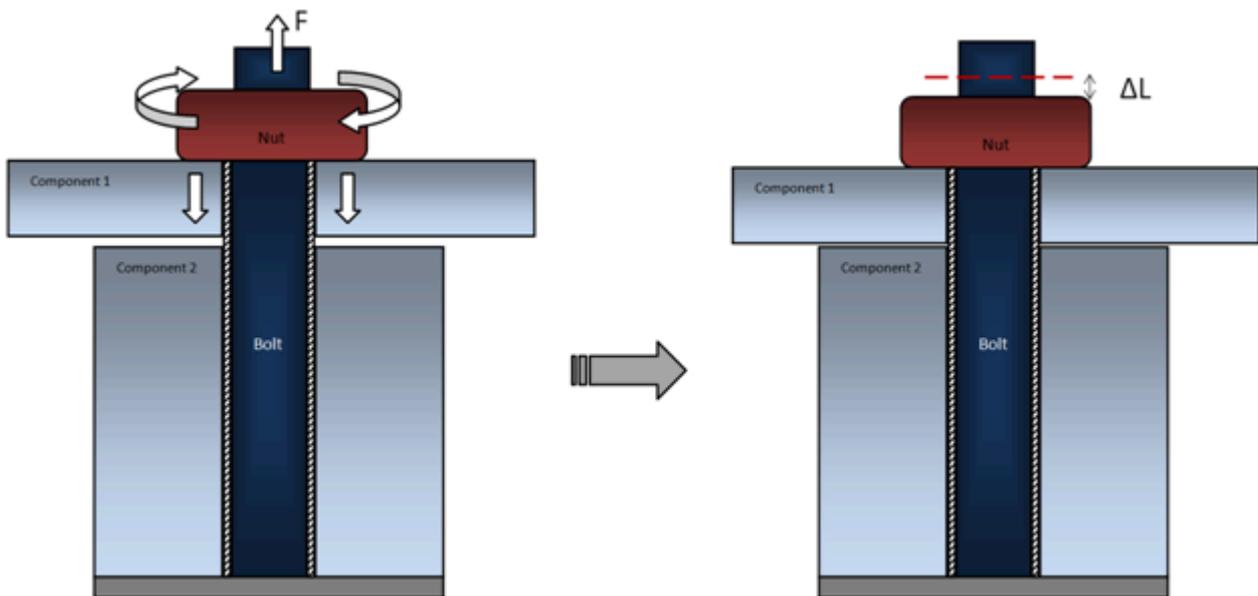


図 356: プリテンションされたアセンブリ - プリテンション荷重の適用 (Step 1)

Step 1では、構造物の組み立ての最初にそれぞれのボルトがナットで締めつけられますが、これは通常、規定のトルクに従って行われます(これは、ねじ山のピッチによって、規定の引張り力に変換されます)。

結果として、ボルトのある作業対象パートは距離 ΔL だけ短くなります。この距離は作用した力と、プリテンションを受けるボルトとアセンブリのコンプライアンスに依存します。

FEA解析において、以下を理解することが重要です:

- プリテンションは、使用されている構造からボルトの一定の長さを取り除くことで、ボルトの締め付け部分を短くします(現実的には、このセグメントはナットを介してスライドしますが、総合的な効果はボルトの作用長さの短縮です)。ボルトは伸長するため、より小さくなったボルト材料の有効長はボルトのマウントからナットまでの距離に及びます。
- 適用される力 f のために、各ボルトの短縮 ΔL の計算には、プリテンションフォースのかかったモデル全体のFEAソリューションが必要となります。これは、与えられた荷重に対するナットの移動量はボルトのコンプライアンス、ボルトのあるアセンブリのコンプライアンスに依存し、プリテンションを受ける複数のボルトの間の相互作用にも影響を受けるためです。

Step 1の最後に、各ボルトの短縮量 ΔL が、プリテンションング過程中に達した位置に単にナットを残すことで定められ、“ロック”されます。

Step 2では、すべてのボルトの短縮量 ΔL で“ロック”されたまま、他の荷重がアセンブリにかけられます(図 357)。この段階では、ボルト内の応力とひずみは通常変化し、取り除かれた材料の長さ ΔL は、各ボルト共一定のままとなります。

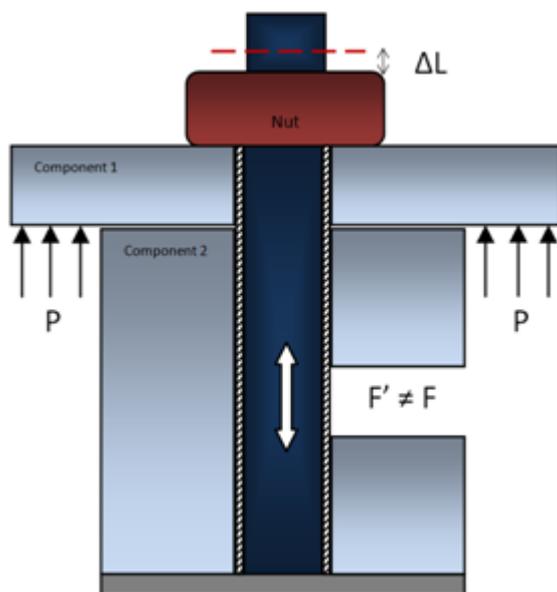


図 357: プリテンションングされたアセンブリ - “ロック”されたボルトの短縮と荷重の適用 (Step 2)

初期荷重の定義

ボルト内に初期荷重を生成するにはまず断面オプション/SECTを用いて、初期荷重が適用される要素のセットを定義します。

断面IDがそこで/PRELOAD入力内で参照されます。初期荷重を生成するために、断面内で参照される要素のセットに適用される初期引張応力が、定義された/SECTの局所Z軸でボルトの長さを短くします。

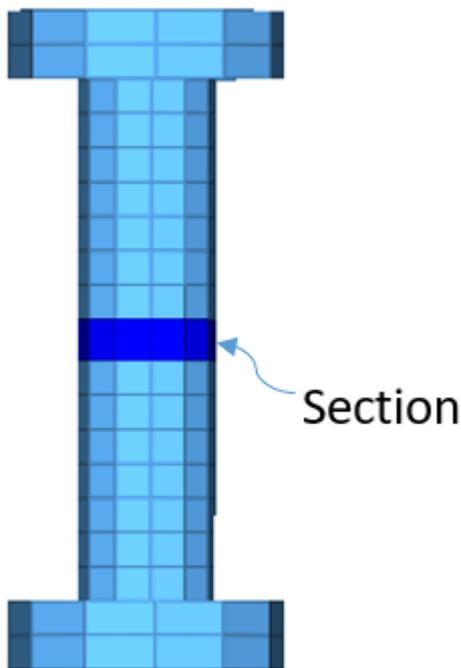


図 358: 初期荷重用の要素のグループを定義する断面

初期荷重の量は、/PRELOAD、 I_{typ} 入力オプションで、力(デフォルト)または応力として入力できます。力が入力されると、/SECTの初期断面面積が、初期荷重を生じさせるために適用される応力の計算に使用されます。定義された/PRELOAD T_{start} START時間において、断面内で定義された要素の材料剛性は減じられ、引張応力が定義された断面の要素に適用されます。これにより要素の長さが短くなり、その結果、必要とされる初期荷重になります。材料剛性が減じられるため、要素内に生成されるひずみの量も少なくなります。

T_{start} STARTと T_{stop} STOPの間のプレロード時間は、材料剛性が減じられた剛性から元の材料剛性に戻る際です。図 359に示すように、一定の低減された剛性があり、続いて元の材料剛性までの線形増加があり、それに一定剛性が続きます。

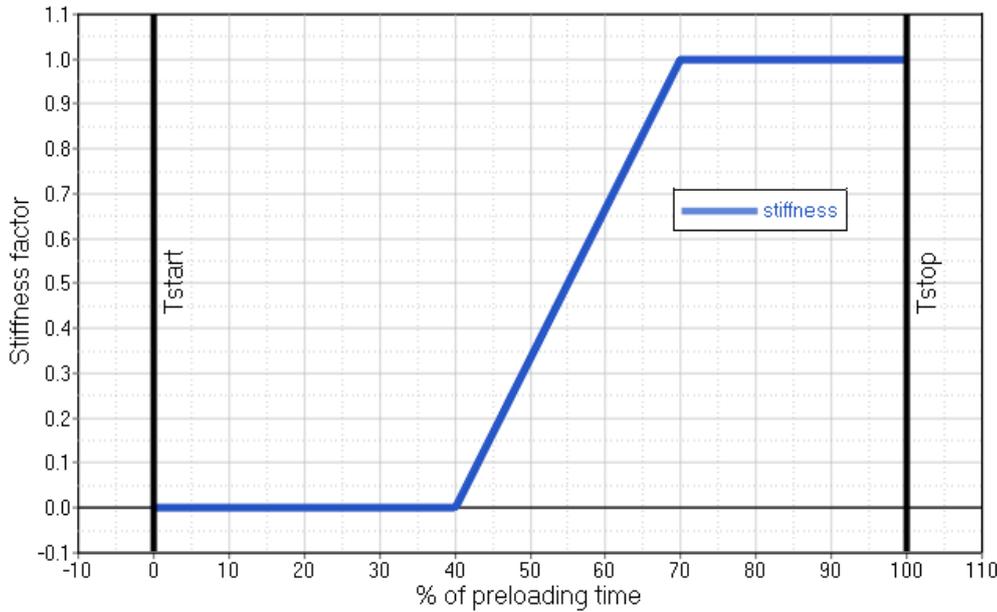


図 359: 材料剛性の増大

初期荷重は、/SENSORの使用によってもアクティブ化され、その場合、 T_{start} STARTおよび T_{stop} STOP時間はセンサーのアクティブ化時間に基づいてシフトされます。

/TH/SECTIONは、プリテンション断面力を出力するために作成される必要があります。ボルト付けされるアセンブリ、ボルトパート群の間の接触ギャップやとボルト材料によっては、ボルトプリテンション入力は必ずしも出力の断面力と完全に一致するわけではありません。

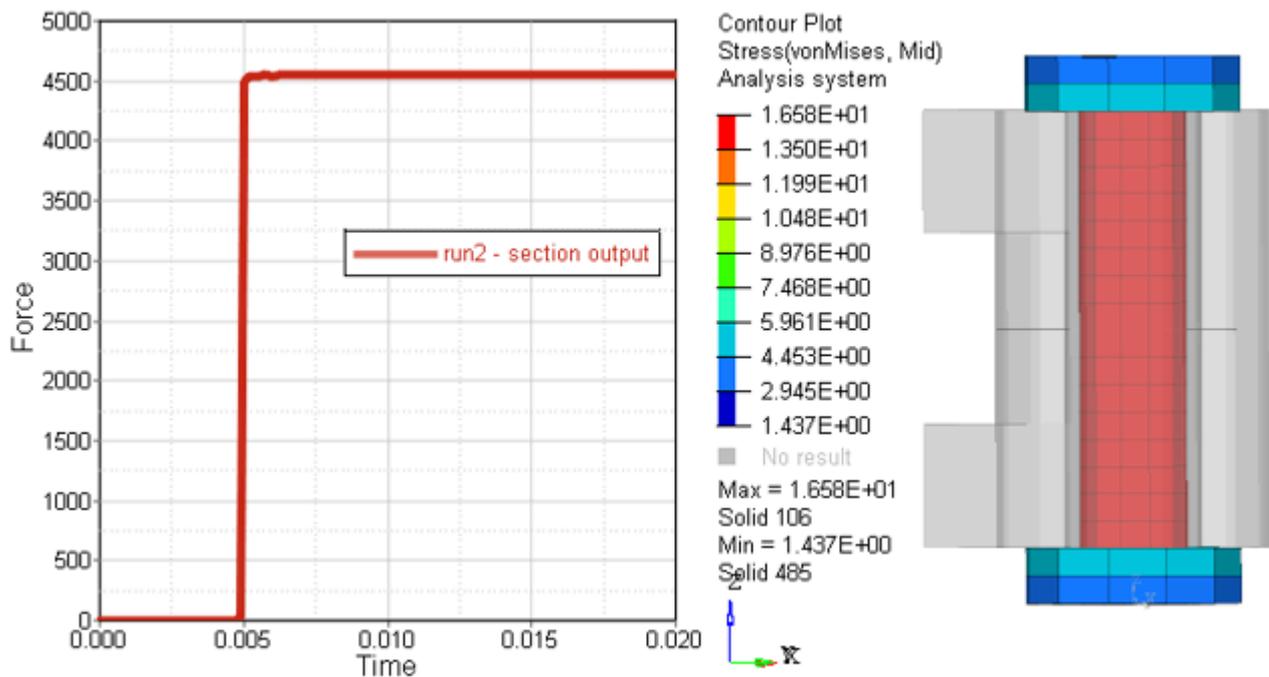


図 360: 断面出力とボルト応力

エアバッグのモデル化

エアバッグは、いくつかの方法でモニター体積/MONVOLとしてモデル化します。

気体や液体を満たした閉じた体積のモデル化に使用するモニター体積には他のタイプもあります。このような閉じた体積の例として、タイヤ、燃料タンク(スロッシングを無視した場合)、液晶画面があります。

モニター体積(/MONVOL)

モニター体積は1つ、またはそれ以上のシェル(3節点または4節点)パートで定義されます。

定義されたサーフェスは閉じている必要があります(Radioss Starterはこれをチェックし、サーフェスが閉じていない場合にはエラーメッセージを出力します)。シェルの法線は体積の外側を向いている必要があります。与えられたパートセットのシェルの法線方向は、負のパート番号を入力することにより反転させることができます(またはプリプロセッサを用いてこれを反転させます)。

エアバッグのモデル化には以下のタイプのモニター体積を用いることができます:

- **AIRBAG1**: 一定圧力の古典的エアバッグ
- **AREA**: ポスト処理の体積と面積の出力対象とする閉じたサーフェス
- **COMMU1**: 連結された一定圧力のチャンバー
- **FVMBAG1**: 有限体積法によって解かれた非一定圧力のエアバッグ
- **GAS**: タイヤ圧力または簡単な燃料タンクのモデル化に使用
- **LFLUID**: 非圧縮性流体のモデル化対象とする、線形流体のモニター体積
- **PRES**: 簡潔な一定圧力のモニター体積

次のいずれかのプロパティおよび材料則を布のモデル化に使用できます。

- /MAT/LAW19 + /PROP/SH_ORTH - 線形弾性布の挙動のモデル化に使用
- /MAT/LAW58 + /PROP/SH_FABR - 非線形弾性布の挙動のモデル化に使用

推奨:

- 繊維材料は膜としての挙動を示すので、その厚みの中で1つの積分点(N=1)を使用することをお勧めします。
- 繊維は、アワグラスがないデフォルトの標準的な三角形(C0)要素定式化を使用した3節点のシェル要素、または $I_{smstr}SMSTR=11$ で $I_{shell}SHELL=12$ としてQBAT要素を使用した4節点シェルでモデル化できます。
- 非推奨になっている方法ですが、 $I_{shell}SHELL=4$ を使用する場合は、アワグラスを回避するために、シェル膜アワグラス係数 hm およびシェル面外アワグラス係数 hf として10%を定義します。
- COMMU1タイプのモニター体積に連結サーフェスを定義するには、ボイド材料則/MAT/VOIDとボイドプロパティ/PROP/VOIDを使用する必要があります。
- FVMBAG1タイプを使用してガスフローの効果をモデル化できます。この効果は、カーテンエアバッグとアウトオブポジション(OOP)のシミュレーションで必要です。
- 一般的に、自己接触インターフェースを定義するために、1つの自動接触インターフェースTYPE7と1つのエッジ-エッジインターフェースTYPE11を定義できます。何らかの初期貫通がある場合は、 $InactiINACTI=6$ を設定します。これら2つの接触を1つのTYPE19接触に置き換えることもできます。

AIRBAG1

体積内で一定圧力が仮定されます。完全気体則と断熱条件が仮定されます。流入質量(または流入質量比率)と温度は、インジェクタープロパティを使用して時間の関数として定義されます。インフレータの開始時間にセンサを定義することができます。

ある圧力(P_{def})または時間(t_{def})基準に達した後のベントホールของガス抜きの定義が可能です。

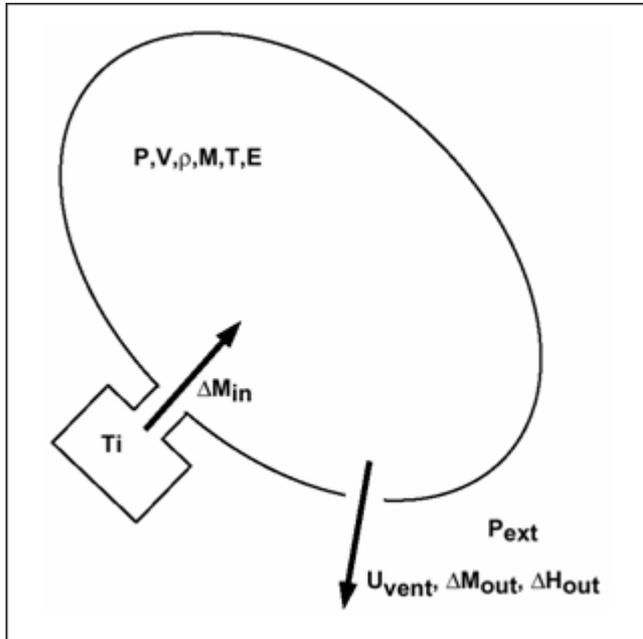


図 361:

数値減衰

粘性 μ を、数値的振動を減少させるために用いることができます。

$\mu = 1$ の場合、臨界減衰(シェルの質量と、体積の剛性)が用いられます。粘性圧力 q は次のように計算されます:

$$q = -\frac{\mu}{A} \sqrt{\frac{PA\rho t}{V}} \frac{dV}{dt} \text{ 次の場合; } \frac{dV}{dt} < 0$$

$$q = 0 \text{ 次の場合; } \frac{dV}{dt} > 0$$

ここで、

t	布の厚さ
ρ	布の密度
A	バッグの表面積

作用する圧力は:

$$P - P_{ext} + q \tag{240}$$

初期条件

ゼロ質量やゼロ体積の初期非つり合いと数学的非連続性を避けるため、以下の初期条件が時間0($I_{equil}EQUIL = 0$)またはジェット開始($I_{equil}EQUIL = 1$ の場合)時に設定されます。

- $P_{ext} = P_{ini}$ 外部圧力
- $T_0 = T_{ini}$ 初期温度 (デフォルトで295K)
- 初期体積が $10^{-4} A^{3/2}$ より小さい場合、一定の小さい体積が初期体積を得るために加えられます: $V_{ini} = 10^{-4} A^{3/2}$
- 初期質量、エネルギーと密度は上の値から定義されます。

時刻0の注入質量を定義する必要はありません。

ガス定義

1. 初期気体と注入気体は /MAT/GAS で定義します。4タイプの気体として、MASS、MOLE、PREDEF、またはCSTAを定義できます。一定圧力下における単位質量あたりの比容量は次のとおりです:

- MASSタイプ

$$C_p = \left(C_{pa} + C_{pb} T + C_{pc} T^2 + C_{pd} T^3 + \frac{C_{pe}}{T^2} + C_{pf} T^4 \right) \quad (241)$$

- MOLEタイプ

$$C_p = \frac{1}{MW} \left(C_{pa} + C_{pb} T + C_{pc} T^2 + C_{pd} T^3 + \frac{C_{pe}}{T^2} \right) \quad (242)$$

ここで、 MW は気体の分子量です。

- CSTAタイプ

ユーザー入力 C_p および C_V (単位は $\left[\frac{J}{kgK} \right]$)。

- PREDEFタイプ

Radiossで事前定義されている約14種類の広く使用されている気体 (窒素、酸素、空気など)。

2. 注入ガス

N_{jet} は、モニター体積別のインジェクター数を指定します。注入気体の材料は、/MAT/GASで指定します。 $fact_ID_M$ で指定した注入質量曲線と $fact_ID_T$ で指定した注入温度曲線を、インジェクターのプロパティ(/PROP/INJECT1または/PROP/INJECT2)で定義します。

注入される質量と注入温度は次のようにして得られます:

- エアバッグの製造者から
- タンクテストから

$sens_ID$ は、注入を開始するセンサー番号です。

3. ジェットング効果 I_{jet} は、/MONVOL/AIRBAG1または/MONVOL/COMMU1でのみ使用します。

$I_{jet} \neq 0$ の場合は、バッグの要素に作用する圧力の過剰分 ΔP_{jet} としてジェットング効果をモデル化します。

$$\Delta P_{jet} = \Delta P(t) \cdot \Delta P(\theta) \cdot \Delta P(\delta) \cdot \max(\mathbf{n} \cdot \mathbf{m}, 0) \quad (243)$$

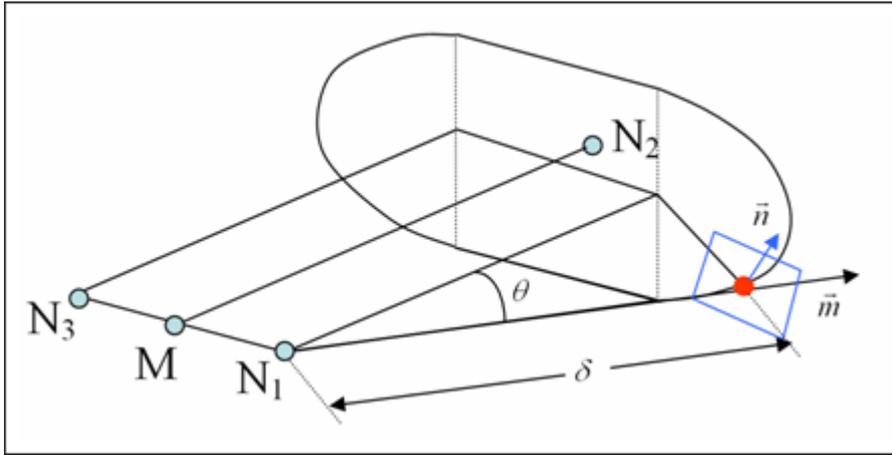


図 362:

N_1 、 N_2 、 N_3 はインジェクターの形状に基づいて設定します (*Radioss Starter Input Manual*を参照)。

$\Delta P(t)$ 、 $\Delta P(\theta)$ 、 $\Delta P(\delta)$ は、 fct_ID_{Pt} 、 $fct_ID_{P\theta}$ 、★によってユーザーが指定する経験的関数です。 $fct_ID_{P\delta}$

ベントホール定義

N_{vent} は用いられるベントホールの数を定義

$surf_ID_v$ はベントホールを定義するサーフェス識別子

A_{vent} はベントの面積 ($surf_ID_v = 0$ の場合) またはスケールファクター ($surf_ID_v$ が0ではない場合)

$B_{vent} = 0$ ($surf_ID_v = 0$ の場合) または衝撃を受けるサーフェスに対するスケールファクター ($surf_ID_v$ が0ではない場合)

$T_{stop}STOP$ は排気の終了時間

$T_{start}START$ は漏れの開始時間

ΔP_{def} は相対ベント空気抜き圧力

Δt_{def} は右記が真となる期間; $\Delta P > \Delta P_{def}$

fct_ID_v は、Chemkinモデル ($I_{form}FORM=2$) の場合の関数識別子 $f_p(P - P_{ext})$

$$vent_holes_surface = A_{vent} \cdot A_{non_impacted} \cdot f_t(t) \cdot f_p(P - P_{ext}) \cdot f_A\left(\frac{A_{non_impacted}}{A_0}\right) \tag{244}$$

$fct_ID_v \neq 0$ の場合、流出速度 v はChemkinにより次のように定義されます:

$$v = Fscale_v \cdot f_v(P - P_{ext}) \tag{245}$$

ここで、 $Fscale_v$ は関数 fct_ID_v のスケールファクターです。

流出質量は次のように計算されます:

$$\dot{m}_{out} = \rho \cdot A_{vent} \cdot f_v(P - P_{ext}) \cdot Fscale_v \tag{246}$$

または、エアバッグとベントホール間のエンタルピー保存、断熱条件、非衝撃流れにより、ベントホールを通過する流出質量流量を P_{ext} 、 ρ 、 P_{vent} 、 u_{vent} 、 A_{vent} の関数として表現できます。

$$\dot{m}_{out} = \rho_{vent} \cdot A_{vent} \cdot u = \rho \left(\frac{P_{ext}}{P} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \cdot A_{vent} \cdot u \quad (247)$$

超音速流れの場合、非衝撃流れであれば、ベント圧力 P_{vent} は外部圧力 P_{ext} と等しくなります。衝撃流れでは、 P_{vent} は限界圧力 P_{crit} と等しくなり、速度 u は限界音速が限界となります：

$$u^2 < \frac{2}{\gamma+1} c^2 = \frac{2\gamma}{\gamma+1} \frac{P}{\rho} \quad (248)$$

および

$$P_{crit} = P \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (249)$$

$$P_{vent} = \max(P_{crit}, P_{ext}) \quad (250)$$

ガス i の流出質量流れは：

$$\dot{m}_{out(i)} = \frac{V^{(i)}}{V} \dot{m}_{out} \quad (251)$$

ここで、 $V^{(i)}$ はガス i で占められた体積で、以下を満足します：

$$V^{(i)} = \frac{n^{(i)}}{n} V \quad (252)$$

$PV^{(i)} = n^{(i)}RT$ および $PV = \left[\sum_i n^{(i)} \right] RT$ から次のようになります。

したがって：

$$\dot{m}_{out(i)} = \frac{n^{(i)}}{\sum_i n^{(i)}} \dot{m}_{out} \quad (253)$$

気孔率

等エンタルピーモデルが空隙率に対しても用いられます。この場合、流出流れの面積は次の式で定義できます：

$$A_{eff} = C_{ps} \cdot Area_{ps} \quad (254)$$

または

$$A_{eff} = C_{ps}(t) \cdot Area_{ps}(P - P_{ext}) \quad (255)$$

ここで、

$C_{ps}(t)$ fct_ID の関数 cps

$Area_{ps}(P - P_{ext})$ fct_ID の関数 aps

インターフェースオプション $I_{bag}BAG=1$ を設定することで、接触発生時の多孔サーフェスの閉鎖を定義することもできます。

See Also

[Monitored Volume \(Theory Manual\)](#)

COMMU1

このオプションはチャンバーに分けられたエアバッグのシミュレートとエアバッグの展開に用いられます。

それぞれのCOMMU1タイプモニター体積は他のCOMMU1タイプモニター体積と排気の連結が可能なAIRBAG1タイプモニター体積として機能します。チャンバー化されたエアバッグは、2つ、またはそれ以上のCOMMU1タイプモニター体積として設計されます。

それぞれのモニター体積はインフレーターとベントホールを持つ事ができます。

ケース 1: 折りたたまれたエアバッグ

折りたたまれたエアバッグをモデル化するには、1つのCOMMU1タイプモニター体積がそれぞれの折りたたまれた部分のために用いられます。折りたたまれた2つの部分の間はボイド(ダミー)のプロパティセットで閉じられます。このボイドのプロパティセットに連結のエリアが定義されます。それぞれの折りたたまれた部分の圧力は異なり、膨らむ間に連結エリアは増大します。このモデル化により、折りたたまれた部分の前にインフレーターのある体積が最初に膨らみます。

体積 1: プロパティ1 + 4 + 5 連結エリア: 体積1から2: プロパティ4

体積1から3: プロパティ5

体積 2: プロパティ2 + 4 連結エリア: 体積2から1: プロパティ4

体積 3: プロパティ3 + 5 連結エリア: 体積3から1: プロパティ5

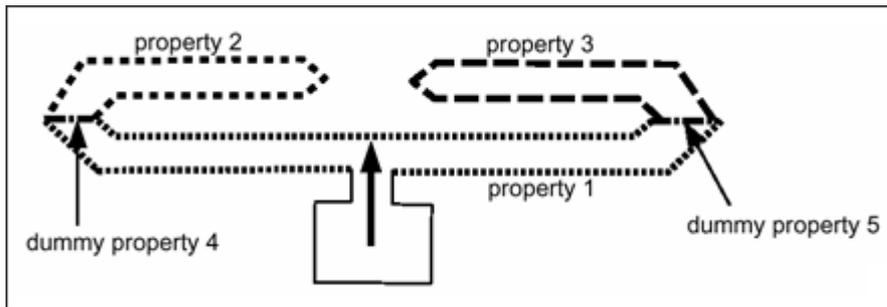


図 363:

ケース 2: 一般使用

2から1への連結があってもなくても、モニター体積1はモニター体積2と連結できます。1から2への連結エリア、排気圧力または時間は、2から1への対応する値と異なっても構いません。これにより、バルブの連結をモデル化できます。

2つの連結モニター体積は共通の節点または共通のシェルプロパティセットをつつことができますが、これはオプションです。

体積1は体積2と連結し、体積2は体積1と3と連結しますが、体積 3から2への連結はありません。

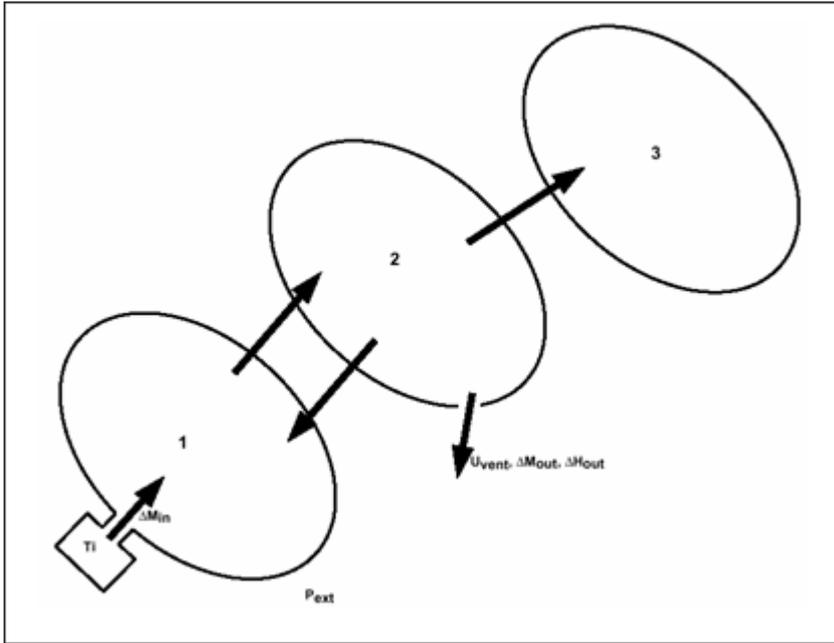


図 364:

一般的な式

AIRBAG1タイプモニター体積と同じ式が用いられますが、連結エアバッグには入力と出力のエンタルピーと運動エネルギーが考慮されています。それぞれの連結体積に対して、圧力が現在の体積よりも低い場合、質量とエネルギーの流れが同じ式でベントホールに対して計算され、外部圧力は連結する体積の圧力に単に置き換えられます：

$$u^2 = \frac{2\gamma}{\gamma - 1} \frac{P}{\rho} \left(1 - \left(\frac{P_{vent}}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \tag{256}$$

ここで、

$$P_{vent} = \max(P_{crit}, P_{neighbor}) \tag{257}$$

$$\rho_{vent} = \rho \left(\frac{P_{vent}}{P} \right)^{1/\gamma} \tag{258}$$

$$\dot{m}_{out} = \rho_{vent} \cdot A_{vent} \cdot u = \rho \left(\frac{P_{ext}}{P} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \cdot A_{vent} \cdot u \tag{259}$$

$$\dot{E}_{out} = \dot{m}_{out} \frac{E}{\rho V} = \left(\frac{P_{ext}}{P} \right)^{\frac{1}{\gamma}} A_{vent} u \frac{E}{V} \tag{260}$$

これらの質量とエネルギーの流束は現在の体積から除かれ、連結する体積に次のサイクルで加えられます。

インフレーター、ベントホール、初期条件

インフレーター、大気圧のベントホールと初期条件は/MONVOL/AIRBAG1タイプモニター体積と同じです。

特有の入力

このタイプ特有の入力は：

μ は粘性係数

P_{ext} は外圧

ΔP_{def} は相対ベント排気圧力

A_{vent} はベント面積 ($surf_ID_v = 0$) または排気ファクター ($surf_ID_v \neq 0$)

T_{start} *START* はベントホールから排気する時間

初期気体と注入気体は /MAT/GAS で定義します。

/PROP/INJECT1 または /PROP/INJECT2. で定義された注入プロパティ

fct_IDM は注入される質量曲線 (または質量比率)

$FscaleM$ は注入される質量曲線 (または質量比率) のスケールファクター

fct_IDT は注入される温度の曲線

$FscaleT$ は注入される温度の曲線のスケールファクター

$sens_ID$ は注入を開始するセンサー番号

$Nvent$ はベントホールの数

$Nbag$ は連結体積の番号

それぞれの連結体積に対して (1 to $Nbag$):

bag_ID は連結体積の ID

$surf_ID_c$ は連結領域を定義

ΔP_{Cdef} は相対連結廃棄圧力

A_{com} は連結領域 ($surf_ID_c = 0$) または排気ファクター ($surf_ID_c \neq 0$)

T_{com} は連結エリアを排気する時間

体積 j 入力で、体積 k との連結のためのデータは j から k への流れにのみ関係します。 k から j への流れに関するデータは体積 k 入力で定義します。

See Also

[Monitored Volume \(Theory Manual\)](#)

FVMBAG1

体積内で一定でない圧力が仮定されます。FVMBAG1 内部の気体流を解析するには、エアバッグ内部の気体流を正しくモデル化できる有限体積積分スキームを使用します。

気体流がシミュレートされることから、エアバッグの正しい展開と膨張の挙動が得られます。これは、正しい姿勢をとっていない乗員のシミュレーションと、カーテンエアバッグの展開が必要です。

完全気体則と断熱条件が仮定されます。流入質量、速度と温度は時間の関数として定義されます。流入速度は以下の式を用いて得られます:

$$v_{in}(t) = \frac{dm(t)/dt}{S\rho_{in}(t)} \quad (261)$$

ここで、 S はインジェクターのサーフェスです。

インフレーター開始時間にセンサを定義することができます。

ある圧力 (P_{def}) または時間 (t_{def}) 基準に達した後のベントホールのガス抜きが定義が可能です。

このバージョンでは、気体熱容量 C_p は一定と仮定されます。

詳細については、[FVMBAG1エアバッグのモデリングガイドライン](#)をご参照ください。

GAS

多くの場合、このモニター体積は、タイヤ圧力または簡潔な燃料タンクのモデル化に使用します。

タイヤのモデルでは V_i はゼロ、燃料タンクのモデルでは V_i は燃料の体積です。

/MONVOL/GASの例

- A tire model:

The inputs are:

- $\gamma = 1.4$
- μ
- $P_{ext} = 10^5$ Pa
- P_{ini} = initial tire pressure

Then, the pressure in the tire is $P_{tire} = P_{ini} - P_{ext}$

- $V_{inc} = 0$
- A fuel tank model if the sloshing effect is neglected

Only if the sloshing effect is neglected, pressure in a partial filled fuel tank can be modeled with a type GAS monitored volume. Use the following input:

- $\gamma = 1.4$
- μ
- $P_{ext} = 10^5$ Pa
- $P_{ini} = 10^5$ Pa
- V_{inc} = volume of fuel

See Also

[GAS Type](#)

LFLUID

流体で満たした体積をモデル化する線形流体モニター体積。

LFLUIDモニター体積では、液体の密度と体積弾性率を定義します。流入側質量流量と流出側質量流量を定義するオプションの曲線が用意されています。体積弾性率も時間の関数として定義できます。

追加圧力対時間の関数を定義することで、追加圧力を扱うことができます。最後に、体積内部の最大圧力を定義できます。

PRES

相対圧力を相対体積の関数または時間の関数とした簡潔な完全気体モニター体積。

PRESモニター体積では、モニター体積内部の圧力(大気圧)を相対圧力 P_{rel} として定義します。

この相対体積は、1つの関数を2つの方法のいずれかを使用して定義します。デフォルトでは相対体積 $P_{rel}\left(\frac{V_0}{V}\right)$ の関数として定義しますが、時間の関数 $P_{rel}(t)$ とすることもできます。

See Also

[PRES Type](#)

モニター体積時間ステップ

“AIRBAG1” 時間ステップはEngine内で推定されますが、この時間ステップは実行の間の時間ステップをコントロールすることはできません。このような場合、入力データに物理的でないエアバッグ定義があることを意味します。

要素時間ステップコントロール

`/DT/AIRBAG`

エアバッグの ΔT_{sca} と ΔT_{min} を定義します。

$\Delta T_{sca} \Delta T_{min}$

`/DT/FVMBAG`

有限体積法エアバッグの ΔT_{sca} と ΔT_{min} を定義します。

$\Delta T_{sca} \Delta T_{min}$

`/DT/FVMBAG` は、モニター体積タイプ `/MONVOL/FVMBAG1` でのみ使用されます。FVMBAG1 エンティティにより計算が規制される場合に、追加の有限体積マージを実行することにより、安定性および最小時間ステップサイズを確保するために、 ΔT_{sca} および ΔT_{min} を定義できます。`/DT/FVMBAG/1` は、 $dt < \Delta T_{min}$ のとき、有限体積をマージするのに使用されず。

FVMBAG1エアバッグのモデリングガイドライン

適用分野

現在のガイドラインでは、Radiossにおける有限体積法(FVM)での数値エアバッグモデルのモデリング要件と検証要件が定められています。

これらのガイドラインは、多くのエアバッグメーカーにより用いられているRadiossバージョン2017.2.5, 2019.2.4, 2020.1, 2021.2の倍精度に基づいています。Radiossの単精度バージョンは、エアバッグの計算には使用できません。ガイドラインの要件は、エアバッグモデリングの一般的な方法に基づいています。一部の要件はFVMに直接は関連しませんが、理解しやすい、衝突シミュレーションに容易に組み込めるエアバッグモデルを作成するために推奨されています。

- FVM - 有限体積法
- FV - 有限体積
- UP - 均等圧力

一般的なエアバッグモデル要件

エアバッグの数値モデルは、乗員安全性問題に関連する衝突イベントの数値シミュレーションのために作成されます。エアバッグモデルは、対象用途によって詳細の量および精度が異なる場合があります。

エアバッグモデルには、ガスジェネレーター、ハウジング、リテーナー、チャンバー間コンポーネント、ベントホール、被覆繊維定義、非被覆繊維の繊維空隙率、ストリップ、テザー、シームなど、エアバッグハードウェアの一般的機能がすべて含まれている必要があります。

エアバッグモデルの形状、質量、慣性特性、および材料は、ハードウェアおよびCADデータと対応している必要があります。

エアバッグコンポーネント、外部サーフェス、内部サーフェス、ベントなどの異なるエアバッグパートは、アセンブリ/SUBSETにまとめられる必要があります。

各エアバッグモデルは、独立して実行され他のコンポーネントモデルまたはフルビークルモデルでインクルードファイルとして使用される1つのモデルを表している必要があります。

エアバッグモデルは設計位置に置かれる必要があります。コンポーネントモデル内またはフルカーモデル内のエアバッグの配置は、/TRANSFORMカードの使用によってなされるべきです。

メッシングと折りたたみ

エアバッグの繊維は、平均要素サイズ3~4mmの三角形要素を用いて非折りたたみ状態でメッシュ化される必要があります。Mixed + tria meshは、バージョン2021.2から利用可能になりました。更に大きな要素サイズは、ベントホールおよびポイド材料を用いたその他のコンポーネント(たとえばチャンバー内のポイドコンポーネント)にのみ受け入れられます。これらのポイド関連要素のすべての節点を周囲の繊維コンポーネントに結合する必要があります。エアバッグ繊維は弾性係数が低いため、通常は要素サイズは時間ステップに影響を及ぼしません。

外部エアバッグ繊維コンポーネントは、外向きの法線がある閉じたボリウムを形成する必要があります。

 注: この制限事項はバージョン2021で解除されましたが、現在も外向きの法線を推奨しています。

エアバッグコンポーネント(たとえば外部、内部、インフレーター、またはハウジング)間の交差は許可されていません。

エアバッグの折りたたみは、CADの折りたたみ設計に従い、プリシミュレーションを使用して実行する必要があります。折りたたみモデルでは、検証された繊維材料定義および接触を使用する必要があります。Radiossは折りたたみのプリシミュレーションに適したソルバーです(エアバッグソリューション)。これを使用することで、折りたたまれたモデルが、対応するセクションにリストされているエアバッグ内部接触定義を使用して正しく機能することが保証されます。

参照形状

参照形状は、平らな節点ベース(/XREF)または要素ベース(/EREF)の形状として表す必要があります。

/EREFの場合、エアバッグの参照形状パートは結合されていない別々のパートでも可能です。

/XREFはまた、結合されていない参照形状と使用されることもあり得ます。この場合、カード内で参照される各パートは、実際のエアバッグモデル内でそれ自体に結合してはいけません。

参照形状は、全体座標系のXY平面に平行である必要があります。

 注: これはFVMアプローチの要件ではありませんが、エアバッグコンポーネントの直交異方性方向の定義を簡略化します。

閉じたボリュームである参照形状の場合：

- 折りたたまれていないエアバッグの形状の中心は、点 $X=0$ 、 $Y=0$ 、または $Z=0$ である必要があります
- 参照形状内のコンポーネントの法線方向は、折りたたまれたエアバッグモデルと同じである必要があります
- 折りたたまれていないエアバッグの参照形状では、交差は許可されていません

要素に基づく結合解除されたエアバッグ参照形状/ $EREF$ の場合：

- 各コンポーネントは $Z=0$ 平面にある必要があります
- 参照形状内のコンポーネントの法線方向は、折りたたまれたエアバッグモデルと同じである必要があります

設計反復計算の間、エアバッグ形状の軽微な変化によるエアバッグ特性への影響を調査するために、参照形状は修正またはモーフィングできます。

 注：参照形状を使用する際、繊維の時間ステップは参照形状の要素サイズに基づいて計算されます。また、初期の材料異方性の方向についても、基準ジオメトリに基づいて計算されます。

気体ジェネレーター

気体ジェネレーターモデルでは、気体ジェネレーター、インジェクター開口部、およびリテーナーといった、CADデータ内にあるすべての詳細が表されている必要があります。

気体ジェネレーターモデルでは、気体ジェネレーター、インジェクター開口部、およびリテーナーといった、CADデータ内にあるすべての詳細が表されている必要があります。インジェクター開口部は、インフレーターサーフェス上の要素で表されます。インフレーターコンポーネントは、 $LAW2$ 材料および/ $RBODY$ 剛体スパイダーを使用するシェルコンポーネントとしてモデル化されます。インフレーターコンポーネントの質量特性と慣性特性は、ハードウェアと対応している必要があります。

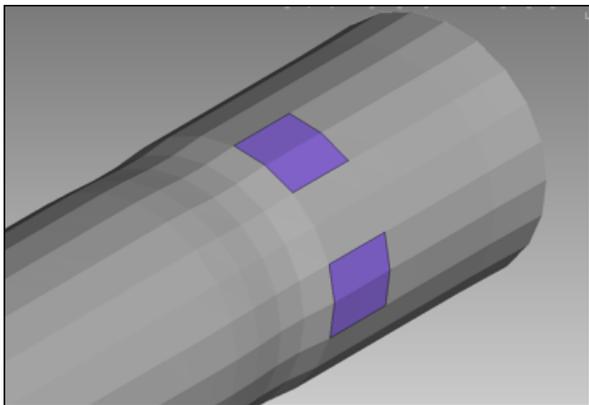


図 365: インフレーターおよびインジェクター要素

注入方向は、要素の法線方向と反対です。異なるインジェクターからの要素が共通要素を共有しないようにしてください。Radiossは、要素が最後に定義されたインジェクターに属するとみなします。また、ベントホールまたは多孔サーフェスからの要素がインジェクターと共通要素を共有しないようにしてください。Radiossは自動的にベントまたは多孔サーフェス定義から要素を除外します。

インジェクターサーフェスは、エアバッグ体積の内側の内部サーフェス上に定義されることもあり得ます。その場合、気体流の方向は、内部サーフェス要素の法線と逆になります。

インフレーターのプロパティ/ $PROP/INJECT1$ および/ $PROP/INJECT2$ は、注入される気体の組成のパラメータを定義します。気体の組成はそれぞれ別々の材料カード/ $MAT/GAS/MASS$ 、/ $MAT/GAS/MOLE$ または/ $MAT/GAS/PREDEF$ とし

て指定されなければなりません。後者の場合、気体材料は/MAT/GAS/PREDEFカードで与えられたキーワードおよび/BEGINカードで指定された単位に従って構築される必要があります。

気体材料定義(単位はkg、mm、ms)の例(定義済み、質量に関連、モルに関連)

```
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/MAT/GAS/MASS/1
INJECTOR MIXTURE
#
#          MW
#          .03300
#          Cpa          Cpb          Cpc          Cpd          Cpe
#          1070.00          0          0          0          0
#          Cpf
#          0
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
```

注入される各気体コンポーネントについて、分子量および比熱係数が定義されます。

熱容量の関数

$$C_p = \left(C_{pa} + C_{pb}T + C_{pc}T^2 + C_{pd}T^3 + \frac{C_{pe}}{T^2} + P_{pf}T^4 \right) \quad (262)$$

は、インジェクターの温度曲線で指定された雰囲気温度と最大温度の値の間の温度が単調に増加している必要があります。この関数が単調に増加していない場合、Radiossは自動的に $C_p(T)$ 関数を修正して単調に保ちます。これは、 $C_{pe} > 0$ もしくは C_{pb} 、 C_{pc} 、 C_{pd} 、 C_{pf} 係数のいずれか1つが負である際に起こります。

注入される気体の組成、気体コンポーネントごとの注入の質量流量および温度は、/PROP/INJECT1または/PROP/INJECT2カードで定義されます。

インジェクタープロパティ定義の例:

```
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/PROP/INJECT1/1
Inflator 1
# Ngases      Iflow          Ascale_T
#          5          1          1
# mat_ID  fct_IDM  fct_IDT          Fscale_M          Fscale_T
#          1          2          1          0          0
# mat_ID  fct_IDM  fct_IDT          Fscale_M          Fscale_T
#          2          3          1          0          0
# mat_ID  fct_IDM  fct_IDT          Fscale_M          Fscale_T
#          3          4          1          0          0
# mat_ID  fct_IDM  fct_IDT          Fscale_M          Fscale_T
#          4          5          1          0          0
# mat_ID  fct_IDM  fct_IDT          Fscale_M          Fscale_T
#          5          6          1          0          0
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
```

このカードは、/MONVOL/FVMBAG1エアバッグカード内で参照されます。

インジェクターのTime to Fire(TTF)は、質量曲線および温度曲線のシフトによってではなく、MONVOL/FVMBAG1内のセンサーによって決定される必要があります。

インフレーターが正しく決定され、/MONVOL/FVMBAG1で参照されると、Radioss Starterにより、インジェクターサーフェスとして使用される要素のリストが出力されます。

```
ELEM:      92 <-> SH3N :      55261587 - INFLATOR :      1
ELEM:     502 <-> SH3N :      55262048 - INFLATOR :      1
ELEM:     622 <-> SH3N :      55261581 - INFLATOR :      1
ELEM:     627 <-> SH3N :      55261568 - INFLATOR :      1
ELEM:     633 <-> SH3N :      55262068 - INFLATOR :      1
ELEM:     814 <-> SH3N :      55261601 - INFLATOR :      1
```

インフレーターモデルは、タンクテストシミュレーションによって検証する必要があります。タンク試験のレポートには、テストで測定された圧力および温度、気体コンポーネントごとのインジェクターの質量流量、および温度曲線が含まれています。試験からの圧力と温度は、シミュレーションでの圧力と温度の平均と比較されます。

エアバッグ内の初期空気

エアバッグ内の空気の材料は、/MAT/GAS/MASS、/MAT/GAS/MOLEまたは/MAT/GAS/PREDEFを使用して指定する必要があります。

後者の場合、気体材料は/BEGINカードで指定された単位に従って/MAT/GAS/PREDEFカードで定義されます。

空気用の一般的な材料カード(kg, mm, ms)

```
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/MAT/GAS/PREDEF/4
Initial gas
AIR
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/MAT/GAS/MASS/102
AIR, kg, mm, ms
#
#           MW
#           Cpa           Cpb           Cpc           Cpd           Cpe
#           966.99           0           0           0           0
#           Cpf
#           0
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/MAT/GAS/MOLE/104
AIR, kg, mm, ms
#
#           MW
#           0.028013
#           cpa           cpb           cpc           cpd           cpe
#           27.088           0           0           0           0
#           cpf
#           0
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
```

エアバッグ内で使用される同じ空気材料が、インジェクターの検証のためのタンク試験シミュレーションでの空気として使用されなければなりません。

エアバッグ繊維材料

エアバッグ材料として使われていた非線形異方性材料LAW58。

材料は、横糸方向と縦糸方向での額縁試験、2軸引張試験、および単軸引張試験によってテストおよび検証する必要があります。

額縁試験は、せん断での繊維材料の挙動を特定します。

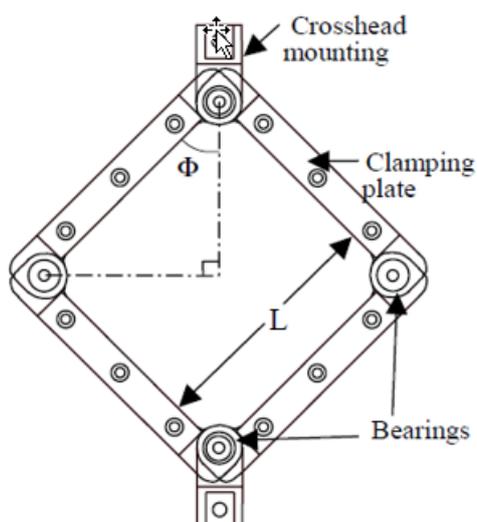


図 366: 額縁せん断リグ

異方性の角度(単位: 度)の関数としてのせん断応力は、額縁試験からの力-変位曲線から抽出され、材料LAW58の入力曲線として使用されなければなりません。

$$\tau = \frac{F}{2 \cdot t \cdot L \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\alpha}{2}\right)} \quad (263)$$

ここで、

$$\alpha = \left(\frac{\pi}{2}\right) - 2 \cdot \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{D}{L}\right) \text{ および } D$$

試験体の上部角の縦方向変位

L

試験体の側面の長さ

F

測定された力

t

布の厚さ

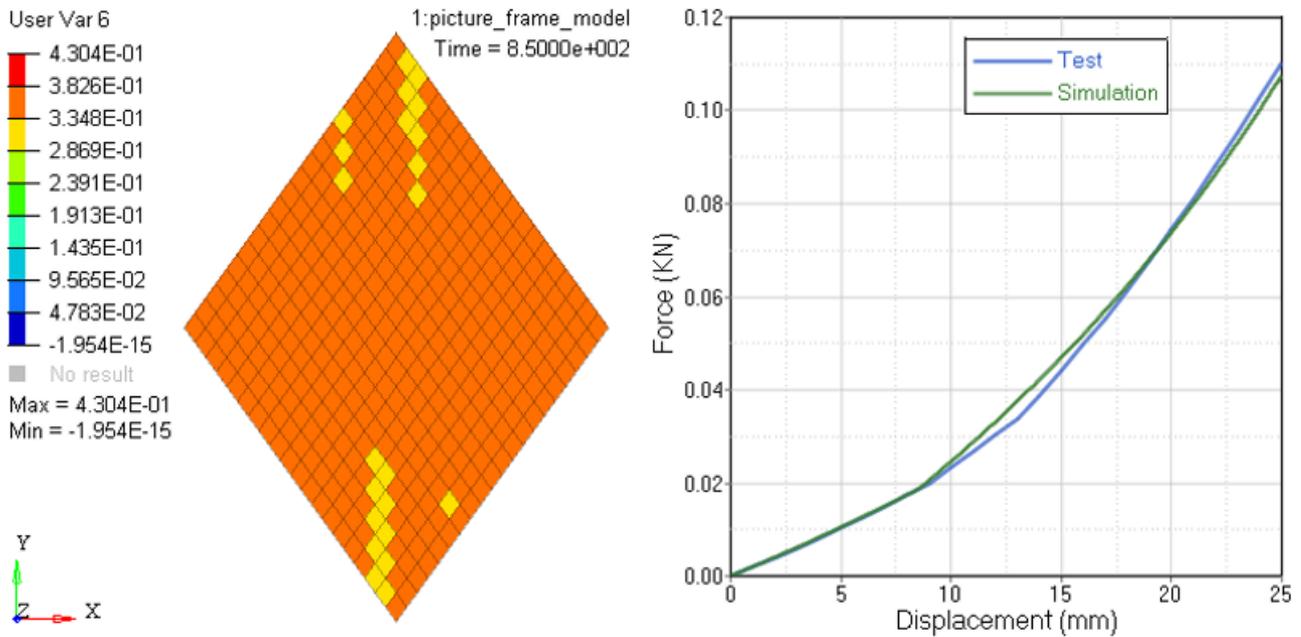


図 367: 額縁試験シミュレーションと異方性の角度の関数としてのせん断応力

周期载荷および除荷額縁試験は、剪断の载荷および除荷曲線を抽出するために行うことができます。曲線は、LAW58材料で入力として直接使用できます。この曲線は、異方性の角度(単位: 度)の負および正の両方の値について指定される必要があります。

2軸試験は、横糸方向と縦糸方向のLAW58の剛性を特定します。

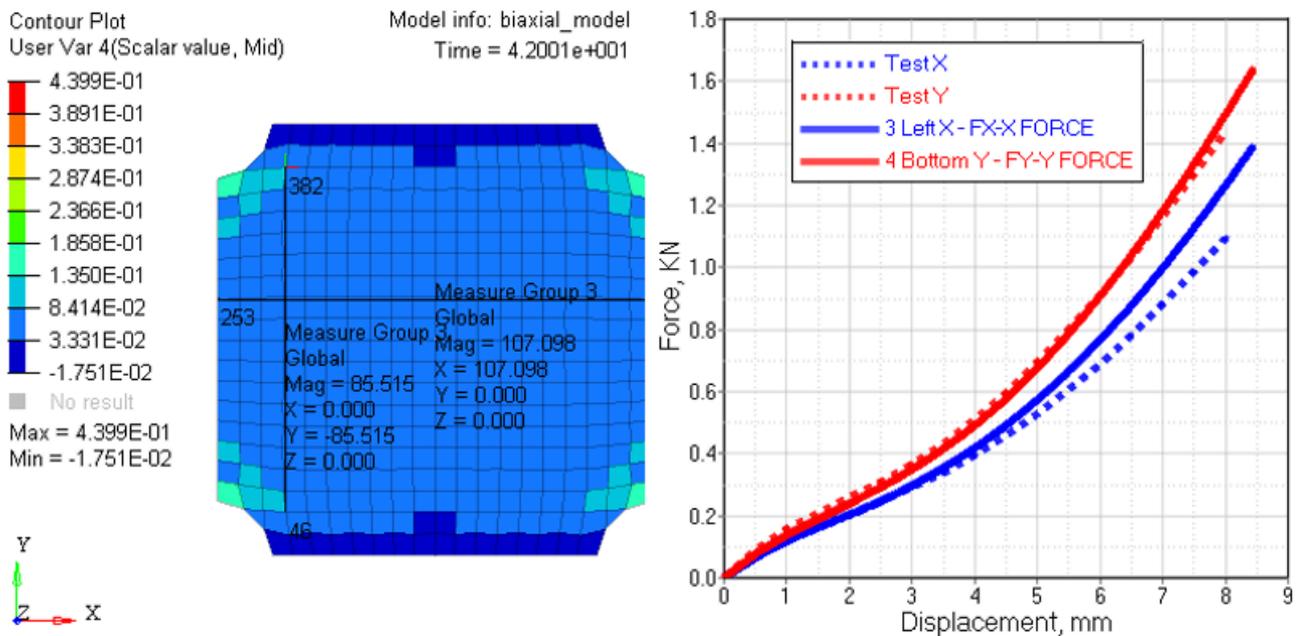


図 368: 縦糸方向と横糸方向での2軸シミュレーションと力 / 変位曲線

横糸方向と縦糸方向の力-変位曲線は、試験体の寸法と板厚を用いて応力-ひずみ曲線に再計算されることが可能です。コーナー境界効果のため、入力曲線の微細なスケーリングやその他の調整が必要な場合もあります。

織られた横糸および縦糸繊維がまっすぐになる前に、単軸試験データを用いてLAW58の初期繊維剛性を検証することが可能です。このフェーズの間、繊維は通常、より柔らかいです。ひずみ矯正パラメータ S_1 および S_2 は、繊維がまっすぐな際に

ひずみはいつかを定義します。 $Flex_1$ および $Flex_2$ は、繊維がまっすぐではない間の横糸および縦糸曲線の剛性を低減するスケーリング係数です。多くの場合、フェーズは非常に短く、 $S_1=S_2=1e-03$ を定義することによって無視され得ます。

$Flex_1$ および $Flex_2$ パラメータもまた、圧縮での横糸および縦糸方向の繊維剛性をスケールダウンするために使用されます。デフォルトでは、 $Flex_1=Flex_2=Flex=0.01$ です。

0、90および45度繊維方向の短軸試験データは、額縁試験と2軸試験を使って検証されたエアバッグ繊維LAW58材料データのダブルチェックに使用できます。

エアバッグのテザーは通常、単軸引張で载荷されます。単軸引張試験は、これらの材料に対して実行および検証する必要があります。45度方向の試験体の検証も、これらに材料については重要です。

LAW58材料は、周期载荷にヒステリシス効果を含む場合があります。载荷および除荷についての応力-ひずみ曲線は、周期2軸引張試験から抽出されなければなりません。

载荷および除荷オプションを伴う汎用LAW58材料(単位: kg、mm、ms)

```
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/MAT/LAW58/2
Altair test fabric law58
#
#          RHO_I          RHO_O
#          8E-7          0
#          E1            B1            E2            B2            FLEX
#          0.380          0            0.380          0            1.0
#          G0            GT            AlphaT0        Gsh            sens_ID
#          0.0035          0.0055          7.175          1
#          Df            Ds            Gfrot            ZEROSTRESS
#          0            0            0            1
#          N1            N2            S1            S2
#          1            1            0            0
#          Dir 1
#          500            1.00
#          Dir 2
#          501            1.00
#          Dir12
#          502            1.00
#          FCT_ID4      FCT_ID5      Fscale4      Fscale5      FCT_ID6      Fscale6
#          600          600          1            1            502          1
/FUNCT/500
stress-strain curve dir 1
#
#          X            Y
0.0000000000e+000      0
1.0000000000e-002      2.9343543750e-003
2.0000000000e-002      5.2630337500e-003
3.0000000000e-002      6.9235412500e-003
4.0000000000e-002      8.4176677083e-003
5.0000000000e-002      1.0120216458e-002
6.0000000000e-002      1.2102790000e-002
7.0000000000e-002      1.4219608542e-002
8.0000000000e-002      1.6595997708e-002
9.0000000000e-002      1.9202795833e-002
1.0000000000e-001      2.2040856250e-002
1.1000000000e-001      2.5270391667e-002
1.2000000000e-001      2.8711702083e-002
1.3000000000e-001      3.2558656250e-002
1.4000000000e-001      3.6676625000e-002
1.5000000000e-001      4.1031145833e-002
1.6000000000e-001      4.5697987500e-002
/FUNCT/600
unloading stress-strain curve dir 1, 2
#
#          X            Y
0.0000000000e+000      0.0000000000e+000
2.0000000000e-002      5.0000000000e-004
4.0000000000e-002      1.0000000000e-003
6.0000000000e-002      2.0000000000e-003
8.0000000000e-002      5.0000000000e-003
1.0000000000e-001      1.0000000000e-002
1.2000000000e-001      3.0000000000e-002
1.4000000000e-001      7.0000000000e-002
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/FUNCT/501
stress-strain curve dir 2
#
#          X            Y
0.0000000000e+000      0
1.0000000000e-002      3.7475658333e-003
2.0000000000e-002      6.4746864583e-003
3.0000000000e-002      8.6433156250e-003
```

```

4.0000000000e-002 1.0769805833e-002
5.0000000000e-002 1.2923027083e-002
6.0000000000e-002 1.5325416250e-002
7.0000000000e-002 1.8090380208e-002
8.0000000000e-002 2.1231860417e-002
9.0000000000e-002 2.4870956250e-002
1.0000000000e-001 2.8884937500e-002
1.1000000000e-001 3.3246235417e-002
1.2000000000e-001 3.8027027083e-002
1.3000000000e-001 4.3127925000e-002
1.4000000000e-001 4.8519200000e-002
1.5000000000e-001 5.4217816667e-002
1.6000000000e-001 6.0077625000e-002
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/FUNCT/502
stress-strain curve dir 12
# X Y
-1.8803485061e+001 -1.5770466522e-003
-1.8097254117e+001 -1.5114614261e-003
-1.7387852291e+001 -1.4413505922e-003
-1.6675208927e+001 -1.3674267252e-003
-1.5959251230e+001 -1.2915012899e-003
-1.5239904181e+001 -1.2138769816e-003
-1.4517090425e+001 -1.1332172636e-003
-1.3790730171e+001 -1.0497187778e-003
-1.3060741077e+001 -9.6747019039e-004
-1.2327038129e+001 -8.8635494868e-004
-1.1589533515e+001 -8.0307143684e-004
-1.0848136486e+001 -7.1778894110e-004
-1.0102753220e+001 -6.4282044814e-004
-9.3532866620e+000 -5.8468504129e-004
-8.5996363643e+000 -5.2563223081e-004
-7.8416983143e+000 -4.6541585980e-004
-7.0793647491e+000 -4.0614312591e-004
-6.3125239587e+000 -3.6168074948e-004
-5.5410600764e+000 -3.1690734331e-004
-4.7648528535e+000 -2.7145205177e-004
-3.9837774194e+000 -2.2537031107e-004
-3.1977040240e+000 -1.8050370403e-004
-2.4064977614e+000 -1.3620800862e-004
-1.6100182740e+000 -9.1442121733e-005
-8.0811943303e-001 -4.6243379765e-005
0 0
8.0811943303e-001 4.6243379765e-005
1.6100182740e+000 9.1442121733e-005
2.4064977614e+000 1.3620800862e-004
3.1977040240e+000 1.8050370403e-004
3.9837774194e+000 2.2537031107e-004
4.7648528535e+000 2.7145205177e-004
5.5410600764e+000 3.1690734331e-004
6.3125239587e+000 3.6168074948e-004
7.0793647491e+000 4.0614312591e-004
7.8416983143e+000 4.6541585980e-004
8.5996363643e+000 5.2563223081e-004
9.3532866620e+000 5.8468504129e-004
1.0102753220e+001 6.4282044814e-004
1.0848136486e+001 7.1778894110e-004
1.1589533515e+001 8.0307143684e-004
1.2327038129e+001 8.8635494868e-004
1.3060741077e+001 9.6747019039e-004
1.3790730171e+001 1.0497187778e-003
1.4517090425e+001 1.1332172636e-003
1.5239904181e+001 1.2138769816e-003
1.5959251230e+001 1.2915012899e-003
1.6675208927e+001 1.3674267252e-003
1.7387852291e+001 1.4413505922e-003
1.8097254117e+001 1.5114614261e-003
1.8803485061e+001 1.5770466522e-003
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|

```

LAW58の入力曲線は単調に増加していきなくてはなりません。横糸方向と縦糸方向の応力-ひずみ曲線は、ひずみ0および正のひずみにおける2つの交差ポイントを有するはずですが、せん断応力vs異方性の角度曲線は、角度0、1つの正の角度、1つの負の角度における3つの交差ポイントを有するはずですが、すべての载荷および除荷曲線が指定されなければなりません。

材料パラメータZEROSTRESSは1に設定する必要があるため、参照形状のアクティブ化のために材料LAW58定義でセンサーを使用する必要があります。これは、/MONVOL/FVMBAG1で1つ目のインジェクターの起動に使用されるのと同じセンサーでなければなりません。

エアバッグ繊維用のプロパティカード

プロパティ/PROP/TYPE16 (SH_FABR) は、LAW58と共に使用する必要があります。

三角形要素のエアバッグの場合のLAW58で使用される一般的な/PROP カード(kg, mm, ms)

```
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/PROP/TYPE16/1
Shell
#   Ishell      Ismstr      Ish3n
#       4         4         2
#           hm           hf           hr           dm           dn
#           0           0           0           0           0
#       N   Istrain      Thick      Ashear      Ithick      Iplas
#       1     0           0.3       0           0           0
#           Vx           Vy           Vz           Isk           Ipos
#           1           0           0           0           0
#           Phi          Alpha      Thick      Z           Mat
#           0           0           0.3       0           1
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
```

繊維については、曲げ剛性はありません。したがって、エアバッグ繊維プロパティには膜の定式化N=1が使用される必要があります。エアバッグは三角形要素で $I_{shell}SHELL=4$ 、 $I_{smstr}SMSTR=4$ 、 $I_{sh3n}SH3N=2$ のプロパティオプションと共にメッシュ化されなければなりません。

4節点シェルは、バージョン2021.2から使用可能です。この場合、 $I_{shell}SHELL=12$ 、 $I_{smstr}SMSTR=4$ を使用する必要があります。

/PROP/TYPE16 (SH_FABR) プロパティでは、繊維材料は各層について定義されます。これは、/PARTカード定義で使われるのと厳密に同じ材料である必要があります。

初期材料方向は、全体 V_x 、 V_y 、 V_z ベクトルを指定することで決定されます。ベクトルは、エアバッグの参照形状の各要素に投影され、続いて角度 Φ によって回転されます。これにより、1つ目の材料方向が決まります。2つ目の材料方向はデフォルトでは、1つ目の方向と垂直、もしくはAlpha入力を使って指定されます。

 注: アワグラス係数および減衰係数のデフォルトパラメータ h_m 、 h_f 、 h_r 、 d_m 、 d_n は、エアバッグの折りたたみの質が良い場合は適切に機能します。

有限体積法エアバッグモデリング

Radiossでは、エアバッグ計算の標準的な方法は有限体積法(FVM)です。

FVMでは、内部エアバッグコンポーネント(内壁、バッフルなど)との相互作用を含め、エアバッグ内の気体流がモデル化されます。FVMエアバッグをセットアップするには、エアバッグカード/MONVOL/FVMBAG1と/MONVOL/FVMBAG2が使用されます。一定圧力エアバッグは、展開、接触、および気体の動的パラメータの全体的な一貫性を確認するためのデバッグ目的で使用できます。デバッグ用に一定圧力エアバッグをアクティブにするには、/MONVOL/AIRBAG1を使用します。

一般的な/FVMBAG1カード:

```
/MONVOL/FVMBAG1/46
FVMBAG1
#surf_IDex      Hconv
666000001      0
#           AscaleT      AscaleP      AscaleS      AscaleA      AscaleD
#           0           0           0           0           0
#   mat_ID      Pext      T0      Iequi      Ittf
666400002      1E-4      296      1           3
#           Njet
#           1
#inject_ID      sens_IDsurf_IDinj
666400002      666000500      666200211
#fct_IDvel      Fscalelevel
666000200      1
#           Nvent      Nporsurf
#           1           2
```

```

# surf_IDv      Iform      Avent      Event      vent_title
666000015      1          0          0
#              Tstart      Tstop      dPdef      dtPdef      IdtPdef
0              1E30      0          0          0
# fct_IDt      fct_IDP      fct_IDA      Fscalet      FscaleP      FscaleA
0              0          0          1          1          1
# fct_IDt'     fct_IDP'     fct_IDA'     Fscalet'     FscaleP'     FscaleA'
0              0          0          1          1          1
#surf_IDps     Iformps     Iblockage      surface_title
666000004      2          0
#              Tstart      Tstop      dPdef      dtPdef      IdtPdef
0              0          0          0          0          0
# fct_IDv      Fscalev
666000004      1
#surf_IDps     Iformps     Iblockage      surface_title
666000003      2          0
#              Tstart      Tstop      dPdef      dtPdef      IdtPdef
0              0          0          0          0          0
# fct_IDv      Fscalev
666000003      1
# frame_ID     kmesh      Tswitch
0              4          20
#              L1          L2          L3
0              0          0
#              Nb1          Nb2          Nb3 grbric_ID surf_IDin      Iref
0              0          0          0          0          0
#              Igmerg      Cgmerg      Cnmerg      Ptole
0              1e-04      1E-4          0
#              qa          qb          Hmin          delta_Tsca      delta_Tmin
0              0          0          0          0
#              Ilvout      Nlayer      Nfacmax      Nppmax      Ifvani
1              0          0          0          0

```

一般的な/FVMBAG2カード:

```

/MONVOL/FVMBAG2/46
FVMBAG2
#surf_IDex surf_IDin      Hconv
666000001      0
# mat_ID      Pext      T0      Ittf
666400002      1e-04      296      3
# Njet
1
#inject_ID sens_IDsurf_IDinj
666400002 666000500 666200211
# Nvent Nporsurf
1 2
# surf_IDv      Iform      Avent      Event      vent_title
666000015      1          0          0
#              Tstart      Tstop      dPdef      dtPdef      IdtPdef
0              1E30      0          0          0
# fct_IDt      fct_IDP      fct_IDA      Fscalet      FscaleP      FscaleA
0              0          0          1          1          1
# fct_IDt'     fct_IDP'     fct_IDA'     Fscalet'     FscaleP'     FscaleA'
0              0          0          1          1          1
#surf_IDps     Iformps     Iblockage      surface_title
666000004      2          0
#              Tstart      Tstop      dPdef      dtPdef      IdtPdef
0              0          0          0          0          0
# fct_IDv      Fscalev
666000004      1
#surf_IDps     Iformps     Iblockage      surface_title
666000003      2          0
#              Tstart      Tstop      dPdef      dtPdef      IdtPdef
0              0          0          0          0          0
# fct_IDv      Fscalev
666000003      1
#              Cmerg      Tswitch      Iswitch      Pswitch
1e-04      20.0          0          0.0
#              CFL      DT_min
0.0          0.0

```

/MONVOL/FVMBAG2カードは、2021.1から使用可能になりました。これは、/MONVOL/FVMBAG1カードの正確な複製です。廃止された未使用の入力は、/MONVOL/FVMBAG2から削除されます。これにより、シンプルで使いやすくなります。/MONVOL//FVMBAG1の注入速度を300m/sと異なる設定にすると、/MONVOL/FVMBAG1と/MONVOL/FVMBAG1カードの結果に多少の違いが生じる場合があります。この値は、/MONVOL/FVMBAG2カードにハードコードされています。

閉じたエアバッグ外部サーフェスは/SURF/PARTを使用して定義する必要があり、外向きの法線があるシェルコンポーネントのセットを参照します。

スケーリングパラメータ $Ascale_T$ 、 $Ascale_P$ 、 $Ascale_S$ 、 $Ascale_A$ および $Ascale_D$ は使用されません。

大気の色は、初期空気材料、初期温度、および初期圧力について定義されます。

パラメータ I_{tff} は、3に設定する必要があります。この場合、ベントは/MONVOL/FVMBAG1で参照されているセンサーで指定された1つ目のインジェクターのTTFの時間にアクティブになり、ベント開口部と空隙を制御するすべての時間依存曲線は1つ目のインジェクターのセンサーアクティブ化時間だけシフトします。

インジェクターの数は、 N_{jet} フラグによって指定されます。注入サーフェスとして使用する要素は、外部または内部エアバッグサーフェスに属する個別のPARTコンポーネントに置かれる必要があります。インジェクターサーフェスについて、別々のインジェクターに同じ要素を使うことはできません。

気体注入を開始するための始動時間(TTF)は、/SENSORで定義する必要があります。グローバルパラメータ定義/PARAMETERは、TTFおよびその他のエアバッグパラメータの入力をパラメータ化するために使用できます。

注入速度の関数では、注入される気体のおおよその音速を定数値で設定する必要があります。この関数は、シミュレーション結果に大きな影響は与えません。

オプション I_{equil} EQUIL=1を使う必要があります。このオプションは、TTFの前のFVM周期を簡易化します。

注入速度の関数では、注入される気体のおおよその音速を定数値で設定する必要があります。この関数は、シミュレーション結果に大きな影響は与えません。

内部サーフェス(内壁、バッフル、バンドなど)は、コンポーネントの集合として定義され、 $surf_ID_{in}$ フィールドで参照されます。

すべての重要なチャンバー間の開口部は、すべての節点が繊維コンポーネントに結合されている個別の隙間コンポーネントとして閉じることを推奨します。これは、他のエアバッグコンポーネントとの交差を回避するために、エアバッグの折り畳みに先がけて行う必要があります。これらのボイド要素を加えることにより、展開シミュレーション中のエアバッグの異なるチャンバーに属する有限体積がマージされなくなります。また、/TH/SURFを使って監視されるエアバッグの異なるチャンバー間のマスフローを出力、制御することも可能です。

 注: ベントを表すチャンバー間のボイドおよびボイドコンポーネントを含んだ外部および内部エアバッグコンポーネントは、形状的に交差があってはなりません。交差がある場合は、有限体積メッシュの作成はできません。

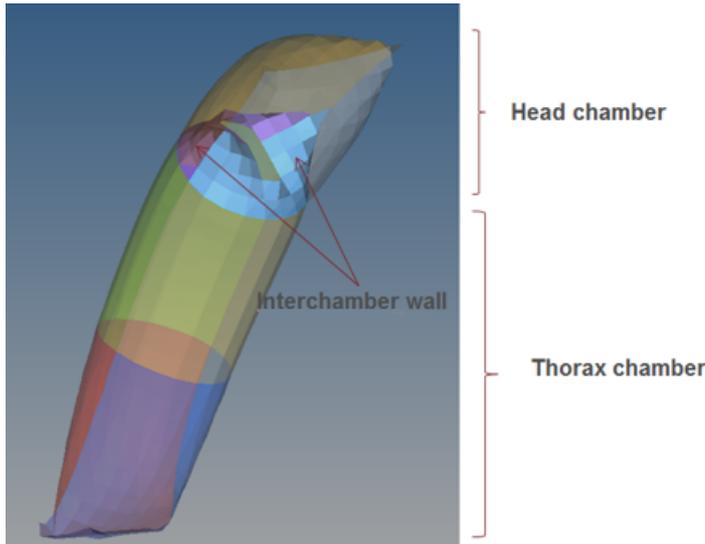


図 369: 2つのチャンバーがある単純なスリーブエアバッグ

初期有限体積メッシュは、オプション/MONVOL/FVMBAG1Kmesh=14が使用されている際は自動的に生成され、手動で作成された初期テトラ有限体積メッシュは、次のセクションで説明されているとおり定義されません。次に、エアバッグの外部および内部サーフェスに交差が存在しないことを確実にするために、エアバッグがチェックされます。交差が存在しない場合、有限体積メッシュは生成されます。エアバッグコンポーネント内の交差のために有限体積が生成され得ない場合は、有限体積メッシュの生成に問題を生じている節点 / 要素の数と場所と共にエラーメッセージが書き出されます。これが起こる際、エアバッグメッシュの問題点の検証と修正にHyperMeshが使用されることが可能です。**tetramesh**パネルの**check 2Dmesh**オプション(デフォルトの設定)を使って、エアバッグの外部および内部コンポーネントがテトラメッシュ生成に受け入れられるかどうかを確認します。Radiossによって作成されたテトラメッシュは、RadiossインクルードファイルMONVOLとして出力されます。

4節点シェルが使用されている場合(2021年2月以降使用可能)、Radiossはいわゆる“スマート分割”を実行して、交差を追加せずに4節点シェルを3節点シェルに分割します。分割後、Radiossは通常どおりテトラメッシュを作成します。

 注: “スマート分割”メッシュは、テトラメッシュを作成するためにのみ使用されます。この場合、すべてのシミュレーションは、元の4節点シェルと三角形シェルメッシュを使用して実行されます。

初期有限体積メッシュをテトラ要素として手動で作成するために、HyperMeshを使うこともできます。この場合、エアバッグの外部および内部コンポーネントはすべて、メッシュの生成時に定義されなくてはなりません。元のサーフェスマッシュに変更がないことを確実にするために、**Fixed trias/quads to tetra mesh**を使用する必要があります。**check 2Dmesh**オプション(デフォルトの設定)を使うと、エアバッグの外部および内部コンポーネントがテトラメッシュ生成に受け入れられるかどうかをチェックできます。

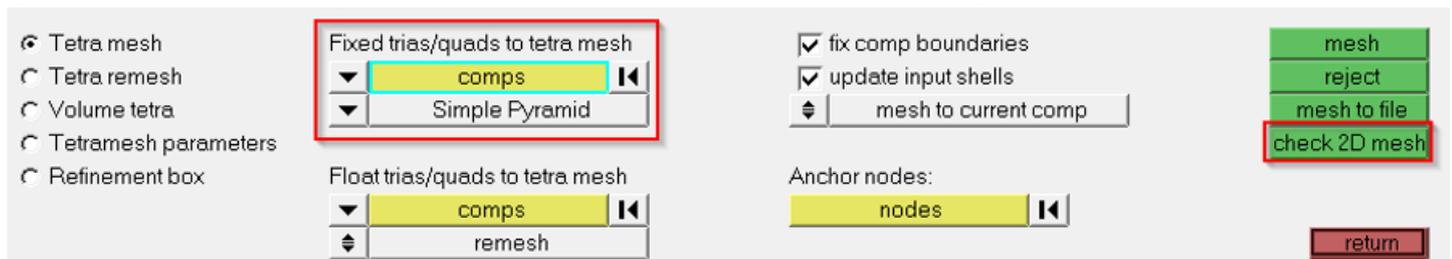


図 370:

初期有限体積メッシュ/TETRA4要素は別の/PARTに置かれ、材料/MAT/VOIDおよびプロパティ/PROP/VOIDが割り当てられます。メッシュは完全にエアバッグの体積を満たしていなければなりません。

エアバッグ内の初期有限体積メッシュのテトラコンポーネント定義の例

```
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/PART/8
TETRA4
      8      8      0
/MAT/VOID/8
tetra
/PROP/VOID/8
tetra
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
```

テトラメッシュがエアバッグの体積全体を満たしていることを確実にするために、Starter出力ファイル内で同じファイルにリストされているINITIAL VOLUME OF MONITORED VOLUME = SUM VOLUME OF FINITE VOLUMESを検証します。また、NUMBER OF FINITE VOLUMES(提示した例では1568個)がHyperMeshで作成したテトラの数と同じであることを確認します。

```
INITIAL VOLUME OF MONITORED VOLUME. . . = 299199.9998912

VOLUME NUMBER          1
NUMBER OF SURFACE POLYGONS. . . . . = 1200
NUMBER OF SURFACE TRIANGLES. . . . . = 1200
NUMBER OF COMMUNICATION POLYGONS. . . = 2536
NUMBER OF COMMUNICATION TRIANGLES. . . = 2536
NUMBER OF FINITE VOLUMES. . . . . = 1568
MIN FINITE VOLUME VOLUME. . . . . = 66.66666700000 (FINITE VOLUME ID 292)
INITIAL MERGING VOLUME. . . . . = 19.08163264612
SUM VOLUME OF FINITE VOLUMES. . . . . = 299199.9998912
SUM AREA SURFACE TRIANGLES. . . . . = 230031.1439046
SUM MASS OF FINITE VOLUMES. . . . . = 3.9428379122204E-04
```

HyperMeshで生成されたテトラメッシュがエアバッグの体積を完全には満たしていない場合、Radiossは追加の体積を満たすよう試みます。これが起こる際、下記のメッセージがStarter出力ファイルに現れます。

```
WARNING ID : 631
** WARNING IN FVMBAG DEFINITION
DESCRIPTION :
-- MONITORED VOLUME ID : 1
-- MONITORED VOLUME TITLE : SAB
IN LOCAL FRAME DIRECTION 1
GIVEN LENGTH 0.000000000000 IS SMALLER THAN BOUNDING LENGTH 301.4996942325
IT IS RESET TO 304.5146911748
WARNING ID : 631
** WARNING IN FVMBAG DEFINITION
DESCRIPTION :
-- MONITORED VOLUME ID : 1
-- MONITORED VOLUME TITLE : SAB
IN LOCAL FRAME DIRECTION 2
GIVEN LENGTH 0.000000000000 IS SMALLER THAN BOUNDING LENGTH 100.0000000000
IT IS RESET TO 101.0000000000
WARNING ID : 631
** WARNING IN FVMBAG DEFINITION
DESCRIPTION :
-- MONITORED VOLUME ID : 1
-- MONITORED VOLUME TITLE : SAB
IN LOCAL FRAME DIRECTION 3
GIVEN LENGTH 0.000000000000 IS SMALLER THAN BOUNDING LENGTH 1.535460483274
IT IS RESET TO 1.550815088107
```

テトラメッシュに基づく有限体積はパラメータをマージすることで提供されるストラテジーに従ってマージされるため、テトラメッシュの質は重要ではありません。 I_{gmerg} 、 C_{gmerg} 、および C_{nmerg} は、/MONVOL/FVMBAG1に入力できます。ただし、 $C_{gmerg} = C_{nmerg} = 1e-04$ に設定することでStarterの初期化中のマージプロセスを非アクティブにし、Engineの高度なマージアルゴリズムを使用することを推奨します。この場合には、/FVMBAG/MODIFまたは/DT/FVMBAG/Iflagにおいて同じパラメータを定義できます。

バージョン2019.1より、/MONVOL/FVMBAG1、/MONVOL/FVMBAG2カードでマージjパラメータとタイムステップパラメータを直接入力できるようになりました。

/MONVOL/FVMBAG1 $I_{fvani} = 1$ である場合、アニメーションファイル*A000は初期有限体積を表します。

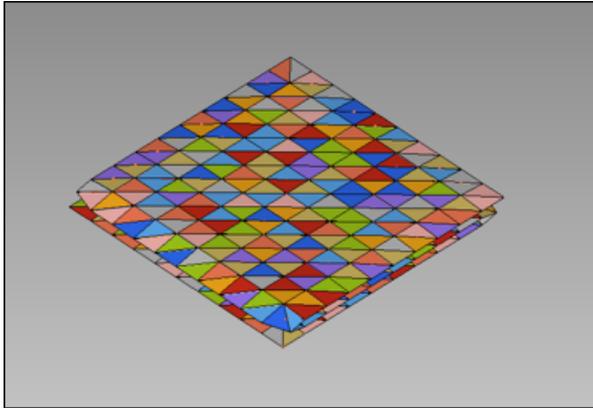


図 371: *A000ファイルにおける初期有限体積の表現

テトラ要素の数は、複雑度、およびエアバッグの種類によって異なります。たとえば、サイドエアバッグは約30,000から50,000個のテトラ、カーテンエアバッグの場合は250,000から500,000個のテトラにできます。

自動ボリュームメッシングオプション/MONVOL/FVMBAG1 $Kmesh=1$ が使われる必要があります。 $Kmesh=14$ を使用 (HyperMeshテトラメッシャー) するか、もしくはHyperMeshでテトラメッシュを生成することが推奨されます。

ベントホール

各ベントホールは、CAD形状内と同じ位置にある個別のコンポーネントとして表す必要があります。

ベントホールは、ボイド材料とボイドプロパティを用いてモデル化されます。隙間ベントコンポーネントのすべての節点を繊維コンポーネントに結合する必要があります。密度、ヤング率および板厚は、エアバッグの繊維材料と同じ値を用いてボイドコンポーネントについて定義される必要があります。これらの値は、内部エアバッグ体積を保持するために役立つ、隙間コンポーネント間で定義されている接触で重要となります。

ベント隙間コンポーネントの材料と特性:

```
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/MAT/VOID/2
Material void
#          RHO          E
          8E-7          0.38
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/PROP/VOID/2
Property void
#          Thick
          0.3
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
```

1つの要素が2つの異なるベントまたは多孔サーフェス定義内で参照されている場合、その要素は最後の定義で使用され、最初の定義からは消去されます(この制限は2017.2.3で削除されました)。

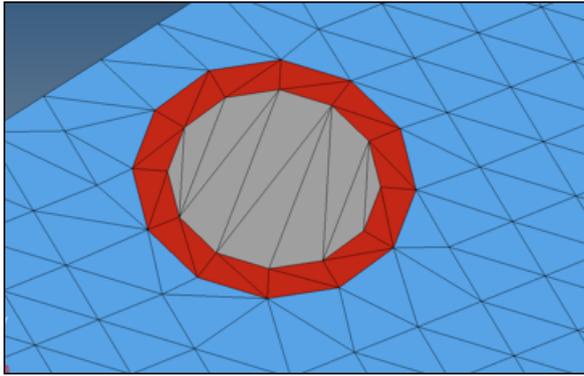


図 372: 青色はエアバッグ繊維、灰色はベントホール、赤色はエアバッグの残りの部分からベントホールを分離するコンポーネント

等エンタルピーのベントホール、およびベントホールをアクティブにするしきい値関数の定義 (kg, mm, ms)

```

/MONVOL/FVMBAG1
.....
# Sid_vent      Ivent          Avent          Event
666000015      1              1              0
#              Tstart          Tstop          dPdef          dtPdef          Idtpdef
              1E30          0              1E-06          0              0
# fct_IDt      fct_IDP      fct_IDA          Fscalet          FscaleP          FscaleA
0              123          0              0              0              0
# fct_IDt'     fct_IDP'     fct_IDA'          Fscalet'          FscaleP'          FscaleA'
0              0            0              0              0              0
.....

/FUNCT/123
1 vent area scaling function
#              X              Y
              -1              0
              0              0
              1e-06          0
              2e-06          1
              1              1

```

ベントホールは T_{start} STARTI において、もしくは ΔP_{def} によって定義された超過圧力に達した際にアクティブ化されることが可能です。 T_{start} START のみを使用するには、大きな ΔP_{def} の値を定義します。 T_{start} START のみを使用するには、大きな ΔP_{def} の値を定義します。 ΔP_{def} を使用する場合、1e-06GPa (1%の大気圧) を用いることが推奨されます。

Starterにより、各ベントホールに属する要素のリストが出力されます。

```

ELEM: 46991 <-> SH3N : 55089506 - VENT HOLE: 1
ELEM: 46992 <-> SH3N : 55089507 - VENT HOLE: 1
ELEM: 46993 <-> SH3N : 55089508 - VENT HOLE: 1
ELEM: 46994 <-> SH3N : 55089509 - VENT HOLE: 1
ELEM: 46995 <-> SH3N : 55089510 - VENT HOLE: 1
ELEM: 46996 <-> SH3N : 55089511 - VENT HOLE: 1
ELEM: 46997 <-> SH3N : 55089512 - VENT HOLE: 1

```

設計プロセス中、ベントホールの直径のバリエーションは、ベントホール領域を満たすためにいくつかの環状コンポーネントを生成することで簡略化できます。ベントホールの直径は、ベントホールサーフェスを定義するパートを変更することによって簡単に修正することが可能です。この手法を用いる際、ベントホールはVOIDプロパティを使ってモデル化することができません。これは、ベントホール要素のすべてがエアバッグの繊維に付加されているわけではないためです。簡略化された直交異方性LAW19もまた、円形ベントの繊維材料を表すために用いることができますが、低減された剛性のもののみです。

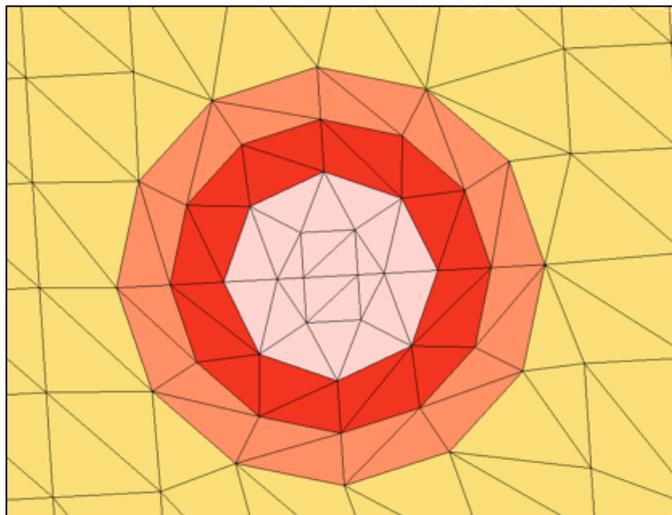


図 373: 可変直径のベントホール

スリットベントのエッジは、スリットベント近くの領域でエアバッグが正しく折りたたまれるよう、硬いスプリング /PROP/TYPE4に結合される必要があります。それらのスプリングは、スリットベントの長さを変化させるためにも使用できます。ベントの閉じたエッジは、開くことがないよう硬いスプリングを使用してモデル化する必要があります。

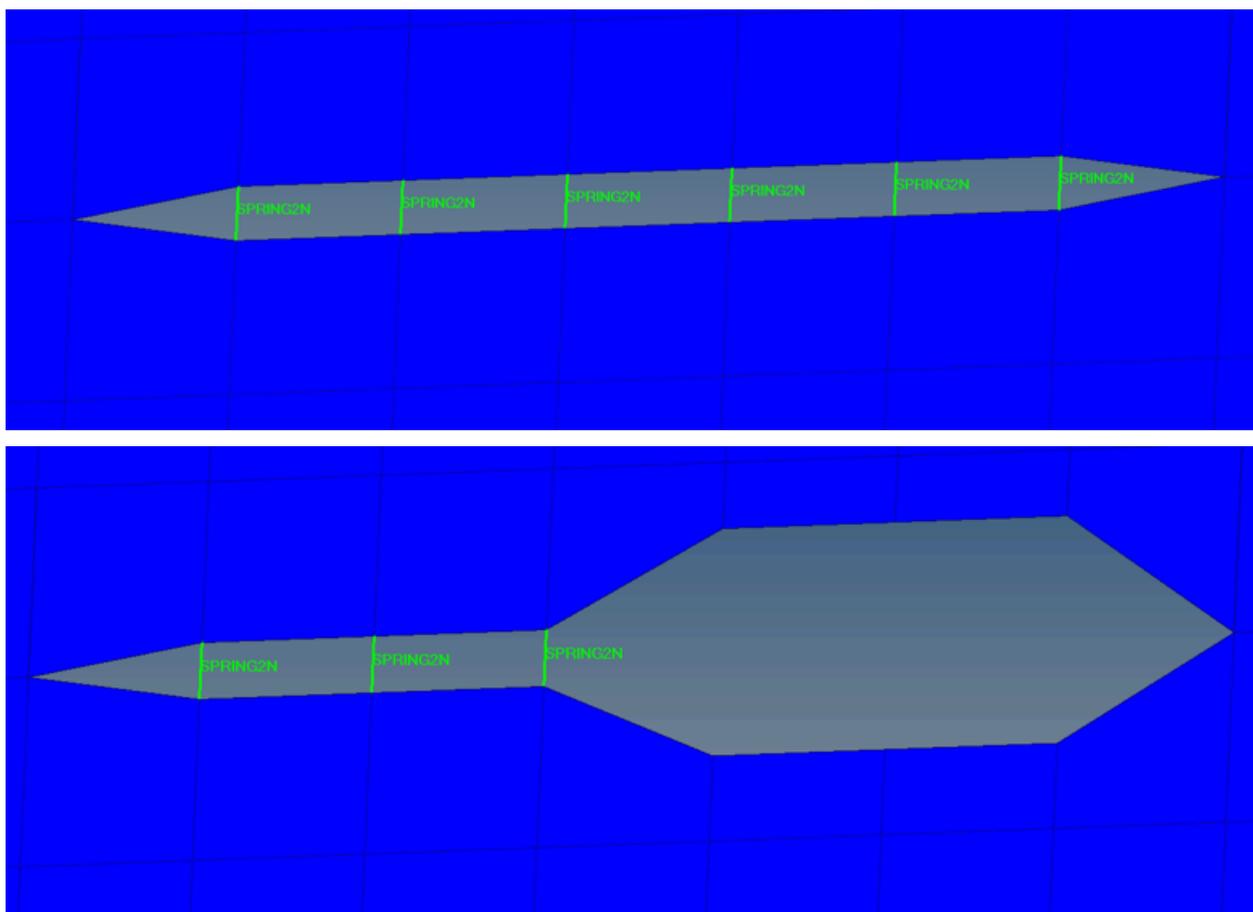


図 374: スリットベントのモデリング

エアバッグ繊維空隙

エアバッグ材料の空隙は、空隙カード/LEAK/MATを/MAT/LAW58カードに加えることでモデル化されます。

エアバッグとハウジングの間の一般的な/TYPE7接触と/TYPE11接触 (kg、mm、ms)

```
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/MAT/LAW58/1
Altair test fabric law58
#      Init. dens.      Ref. dens.
#      8E-7            0
#      E1              B1              E2              B2              FLEX
#      0.380           0              0.380           0              1.0
#      G0              GT              AlphaT          Sensor
#      0.0035          0.0055         7.175           1
#      Df              Ds              Gfrot          ZeroStress
#      0              0              0              1
#      N1              N2              S1              S2
#      1              1              0              0
#      Dir 1          500              1.00
#      Dir 2          501              1.00
#      Dir12         502              1.00
#      FCT_ID4       FCT_ID5          Fscale4         Fscale5       FCT_ID6         Fscale6
#      600           600              1              1              502              1
/LEAK/MAT/1
Fabric
#      Ileak          AscaleT          AscaleP
#      1
#      AC' fct_IDAC'
#      LC              AC
#      1.0e-03         1.0e-03
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
```

/LEAK/MATは、この材料を有するコンポーネントの有効空隙面積が時間または圧力の関数として以下に変化するかを指定します。これは、*Ileakage*の値によって決定されます。

Ileakage = 1:

$$A_{eff} = \sum_n LC \cdot AC \cdot Area_n \quad (264)$$

Ileakage = 2:

$$A_{eff} = \sum_n LC(t) \cdot AC(P) \cdot Area_n \quad (265)$$

Ileakage = 3:

$$A_{eff} = \sum_n LC(t) \cdot AC(P - P_{ext}) \cdot Area_n \quad (266)$$

Ileakage = 4:

$$A_{eff} = \sum_n LC(Area_n / Area_0) \cdot AC(P_{ext} / P) \cdot Area_n \quad (267)$$

Ileakage = 5:

$$A_{eff} = \sum_n \frac{Area_0}{L^2} [(C_1 \Delta P^{C_2} - C_3)(L - R)^2 + C_3(L\lambda_1 - R/\sqrt{\lambda_2})(L\lambda_2 - R/\sqrt{\lambda_1})] \cdot \sin\alpha_{12} \quad (268)$$

$$\Delta P = P / P_{ext} - 1$$

ここで、 λ_1 と λ_2 は縦糸と横糸方向の伸びで α_{12} は縦糸と横糸方向の間の角度です。

Ileakage = 6:

$$A_{eff} = \sum_n Area_n (X_0 + X_1 r_s + X_2 r_p + X_3 r_s r_p) \quad (269)$$

ここで、 $r_s = Area_n / Area_0$ および $r_p = P_{ext} / P$

この材料を含むパートは、/MONVOL/FVMBAG1surf_ID_{ps} オプションを使ってサーフェスIDで参照される際、多孔質とみなされます。

/MONVOL/FVMBAG1での多孔質定義の例

```

#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/MONVOL/FVMBAG1/1
DAB
#      Isur
#      4
#      Scal_T          Scal_P          Scal_S          Scal_A          Scal_D
#      -0              0                0                0                0
#      Mat_ID          Mu              Pext            Tphi           Iequi          Ittf
#      4              0.1              0.00010135       0              0              3
#      Njet
#      1
#      Inj_ID          Isensor surf_IDinj
#      10             1              100
#      Nvent          Nps
#      0              1
#Sur_id_ps          Iform_ps
#      4              1
#      Tstart          Tstop          dPdef          DtPdef          ldtpdef
#      ...
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|

```

多孔質材料を通るマスフローは /MONVOL/FVMBAG1 Iform_{ps} を使って定義され、以下の式を有します:

- $Iform_{ps} = 1 \quad \dot{m}_{out} = A_{eff} \sqrt{2P\rho} Q^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma-1} \left[1 - Q^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}$ (Isentropic - Wang Nefske)
- $Iform_{ps} = 2 \quad \dot{m}_{out} = A_{eff} \rho v (P - P_{ext})$
ここで、 v は気体の流出速度 (Chemkin)
- $Iform_{ps} = 3 \quad \dot{m}_{out} = A_{eff} \sqrt{2\rho(P - P_{ext})}$ (Graefe)

Iform_{ps} = 2オプションは通常、繊維の空隙を表すために使用されます。試験データからのエアバッグの超過圧力の関数としての気体の流出速度。

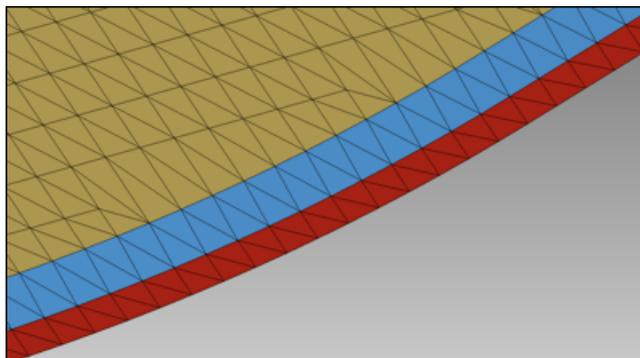


図 375: 多孔繊維(黄色)は青色の非VENTコンポーネントによって浸透性シーム(赤色)から分離されます

排気および繊維空隙のアクティブ化

ガス注入をアクティブ化するためのセンサーがない場合、VENTホールと空隙は $T > T_{start}$ または圧力 $P > \Delta P_{def}$ 値が $\Delta t P_{def}$ で与えられた時間より大きい際にアクティブになります。これらの値はすべて /MONVOL/FVMBAG1 を用いて入力されます。

少なくとも1つのインジェクターがセンサーでアクティブになっている場合、排気オプションと空隙オプションのアクティブ化は I_{tff} で制御されます。

T_{inj} は、センサーによって最初のインジェクターがアクティブになる時間です。

$I_{tff} = 0$

	排気、空隙
アクティブ化	$P > \Delta P_{def}$ の場合に $\Delta t P_{def}$ よりも長い時間、または $T > T_{start}$
非アクティブ化	$T_{stop} STOP$
時間依存関数	シフトなし

$I_{tff} = 3$

	排気、空隙
アクティブ化	$T > T_{inj}$ および $P > \Delta P_{def}$ の場合、 $\Delta t P_{def}$ よりも長い時間、または $T > T_{inj} + T_{start}$
非アクティブ化	$T_{inj} + T_{stop}$
時間依存関数	右記によってシフト; $T_{inj} + T_{start}$

関連する他のすべての曲線は、対応する排気、空隙、または連結のオプションがアクティブな場合にアクティブになります。

エアバッグ内部接触

VENTに用いられるチャンバー間のポイドおよびポイドコンポーネントを含んだ外部および内部エアバッグコンポーネントは、形状的に交差があってはなりません。

内部エアバッグ接触を表すには、/INTER/TYPE7接触と/INTER/TYPE11接触の組み合わせを使用します。

一般的な/INTER/TYPE7エアバッグ接触(kg, mm, ms):

```
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/INTER/TYPE7/666700001
Airbag Selfcontact - 666700001
# Slav_id Mast_id Istf Ithe Igap Ibag Idel Icurv Iadm
666100I03 666100I01 4 0 0 1 0 0 0
# GAP_SCALE GAP_MAX Fpenmax
0 0 0
# STMIN STMAX %MESH_SIZE dtmin
1 1E30 0 0
# STFAC FRIC GAP_MIN Tstart Tstop
1 0 1 0 0
# I_BC INACTI VIS_S VIS_F BUMULT
```

```

      000          6          0          0
#   Ifric   Ifiltr          Xfreq   Iform
      0          0          0          2
/SURF/PART/666100101
Airbag External Surface by Part - 666100101
666000001 666000002 666000003 666000004 666000005 666000006 666000007 666000008 666000009 666000013
666000014 666000015 666000016 666000017 666000018 666000201 666000202 666000203
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|

```

/INTER/TYPE7接触の場合:

- ベントに用いられるチャンバー間のボイドおよびボイドコンポーネントを含んだ外部および内部繊維コンポーネントは、コンポーネントがセカンダリ節点およびメインサーフェスとしてリストされている自己接触で定義されなければなりません。
- $I_{stf}STF=4$ にすることで、正しい接触剛性を提供します
- $I_{bag}BAG=1$ にすることで、接触によってベントが閉鎖します
- $St_{min}MIN=1KN/mm$ にすることで、最小接触剛性を制限します
- $Gap_{min}min=1mm$ にすることで、セカンダリ節点がメインセグメントに接近するにつれ、接触力がスムーズに増加します
- 摩擦は0に設定されます
- $InactiINACTI=6$ にすることで、初期貫通を非アクティブにします

初期貫通は、HyperCrashの貫通チェッカーによってチェックできます。このエアバッグモデルは、エアバッグ繊維の物理的な厚みまで貫通しないようにする必要があります。例えば、エアバッグ繊維の厚みが0.3mmの場合は、エアバッグを $Gap_{min}min = 1$ の値の30%までで貫通を止める必要があります。

一般的な/INTER/TYPE11エアバッグ接触(kg, mm, ms)

```

#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/INTER/TYPE11/666800001
Airbag Selfcontact Edge - 666800001
#   Slav_id   Mast_id   I_stf          I_gap   Multimp          Idel
666100102 666100102          4          0          0          0
#           STmin          STmax          MESH_SIZE          dtmin          Iform          Sens_Id
#           1          0          0          0          2          0
#           STFAC          FRIC          GAP          Tstart          Tstop
#           1          0          0.9          0          0
#   I_BC          INACTI          VIS_S          VIS_F          BUMULT
      000          6          0          0          0
/LINE/SURF/666100102
Airbag Line by Surface - 666100102
666100101
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|

```

/INTER/TYPE11接触の場合:

- チャンバー間の隙間、およびベントのための隙間コンポーネントなど、すべての外部および内部繊維コンポーネントをセカンダリ側とメイン側の両方にリストする必要があります
- $I_{stf}STF=4$ にすることで、正しい接触剛性を提供します
- $St_{min}MIN=1KN/mm$ にすることで、最小接触剛性を制限します
- $Gap_{min}min=0.9mm$ にすることで、セカンダリ節点がメインセグメントに接近するにつれ、接触力がスムーズに増加しますこの接触ギャップは、/INTER/TYPE7接触ギャップの90%です
- 摩擦は0に設定されます
- $InactiINACTI=6$ にすることで、初期貫通を非アクティブにします

初期貫通は、HyperCrashの貫通チェッカーによってチェックできます。エアバッグモデルは $Gap_{min}min$ 値の90%まで貫通解除され、その結果、最大貫通は $Gap_{min}min$ 値の10%となります。

このモデルに初期交差がないと仮定すると、TYPE7とTYPE11接触の定義によって、エアバッグシミュレーションの際に節点とサーフェスおよびエッジとエッジが交差することがなくなります。モデルに初期貫通が存在する場合、節点がメインサーフェスの正しくない側でスタックする可能性があるため、モデルは不安定になることがあります。これに加え、エアバッグコンポーネントに交差がある場合は有限体積メッシュを作成できません。そのため、すべての初期交差を除去することが重要となります。

Engineファイルで/DT/INTER/DELオプションが使用されていると、エアバッグのセカンダリ節点を内部接触から除去でき、エアバッグ繊維が局所的に交差し、エアバッグシミュレーションの精度が低下します。このオプションが使用されている際は、/INTER/TYPER7および/INTER/TYPER11内部接触定義で局所 $dtmin=1e-5ms$ を定義します。これは、全体/DT/INTER/DEL $dtmin$ 値を無効にします。

 注: モデルの時間ステップを、接触の運動時間ステップによって制限しないようにしてください。

エアバッグハウジング

エアバッグハウジングは、CADデータで使用可能なすべての詳細を表している必要があります。

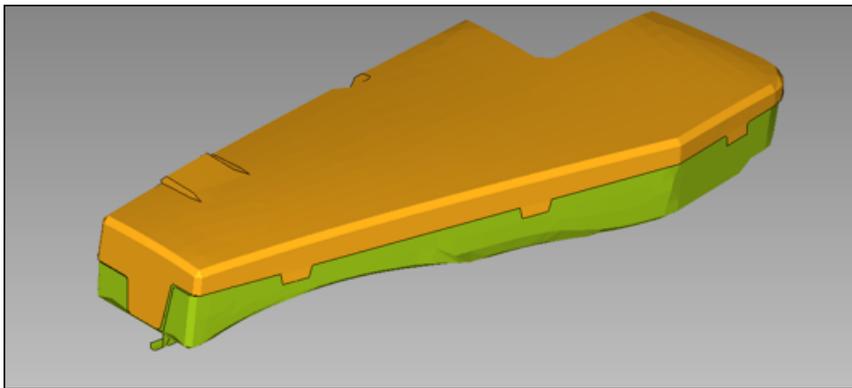


図 376: エアバッグハウジング

フルビークルシミュレーションにエアバッグが含まれている際、メッシュサイズと品質はフルビークルと同様でなければなりません。弾塑性材料のモデル化には、材料則LAW2およびLAW36を使用することができます。エアバッグカバーの開口部を再現するために、破断を伴う材料を使用する必要があります。

ソリッドフォームコンポーネントはLAW38またはLAW70を使用してモデル化する必要がありますが、超弾性コンポーネントはLAW42を使用してモデル化します。

シェルの要素プロパティ/PROP/TYPER1では、アウグラス効果を避けるために $I_{shell}SHELL=24$ を使用する必要があります。ソリッドフォームコンポーネントまたは超弾性コンポーネントの場合は、/PROP/TYPER14を使用し、 $I_{solid}SOLID=24$ および $I_{smstr}SMSTR=10$ を指定します。

エアバッグと周辺の間接触

エアバッグとその周辺との間の接触は、次のような特定の接触に分離する必要があります。

- エアバッグとインフレーター
- エアバッグとハウジング
- エアバッグとダミー
- エアバッグとシート構造

エアバッグとハウジングの間の一般的な/TYPE7接触とTYPE11接触 (kg、mm、ms)

```
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/INTER/TYPE7/666710001
Airbag vs. Housing
# Slav_id Mast_id Istf Ithe Igap Ibag Idel Icurv Iadm
666100103 666200201 4 0 0 1 2 0 0
# Fscale_GAP GAP_MAX Fpenmax
0 0 0
# STMIN STMAX %MESH_SIZE dtmin
1 1E30 0 0
# STFAC FRIC GAP_MIN Tstart Tstop
1 .1 1 0 0
# I_BC INACTI VIS_S VIS_F BUMULT
000 6 0 0 0
# Ifric Ifiltr Xfreq Iform
0 0 0 2
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/INTER/TYPE7/666710002
Housing vs. Airbag
# Slav_id Mast_id Istf Ithe Igap Ibag Idel Icurv Iadm
666100104 666200202 4 0 0 1 2 0 0
# Fscale_GAP GAP_MAX Fpenmax
0 0 0
# STMIN STMAX %MESH_SIZE dtmin
1 1E30 0 0
# STFAC FRIC GAP_MIN Tstart Tstop
1 .1 1 0 0
# I_BC INACTI VIS_S VIS_F BUMULT
000 6 0 0 0
# Ifric Ifiltr Xfreq Iform
0 0 0 2
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/INTER/TYPE11/666810001
Airbag vs. Housing
# Slav_id Mast_id I_stf I_gap Multimp Idel
666100102 666200203 4 0 0 2
# STmin STmax MESH_SIZE dtmin Iform Sens_Id
1 0 0 0 2 0
# STFAC FRIC GAP Tstart Tstop
1 0 0.9 0 0
# I_BC INACTI VIS_S VIS_F BUMULT
000 6 0 0 0
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
```

通常は、2つの対称的な/INTER/TYPE7接触、および1つの/INTER/TYPE11エッジ間接触を指定する必要があります。これらの接触には、次のような接触設定を使用します：

- $I_{stf}STF=4$ 、適切な接触剛性を提供
- $I_{bag}BAG=1$ 、ベントを閉鎖
- $I_{del}DEL=2$ 、削除された要素を接触から除去
- $St_{min}MIN=1KN/mm$
- $I_{form}FORM=2$

時刻歴およびアニメーション出力

時刻歴出力/TH/MONVには、デフォルト(DEF)変数グループの要求が推奨されます。これには以下が含まれます：

- グローバルな気体の動的パラメータ：気体の質量、エアバッグの体積、エアバッグの面積、圧力(平均)、温度(平均)、および熱容量係数(平均)
- 各ベントホールについて：ベント面積、流出速度、および流出質量(2017.2.3で始まったデフォルト)
- 有限体積パラメータ：有限体積の数(NFV)、および最小の有限体積時間ステップ(DTBAG)2017.2.4以前のバージョンでは、NFVオプションとDTBAGオプションはデフォルト出力に含まれていなかったため、古いバージョンを使用する際には定義する必要があります。

5つのベントホールがある一般的な時刻歴出力カード

```
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/TH/MONV/666000001
```

```
Airbag MonVol Time History - 666
# var1 var2 var3 var4 var5 var6 var7 var8 var9 var10
DEF NFV DTBAG
# Obj1 Obj2 Obj3 Obj4 Obj5 Obj6 Obj7 Obj8 Obj9 Obj10
666000001
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---
```

局所圧力は、試験内で圧力がインジェクターを近傍で計測されるエアバッグ繊維の節点を用いて圧力/GAUGEを生成することにより、モデル内で計測されなければなりません。

圧力ゲージの一般的な時刻歴出力カード

```
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/GAUGE/1
FWD
# node_ID shell_ID DIST
50050421
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/TH/GAUGE/1
TH GAUGE
# var1 var2 var3 var4 var5 var6 var7 var8 var9 var10
DEF
# Obj1 Obj2 Obj3 Obj4 Obj5 Obj6 Obj7 Obj8 Obj9 Obj10
1
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---
```

浸透性のある内部エアバッグサーフェスを介した質量流量は、/TH/SURFカードを使って出力できます。

面積および浸透性のある内部エアバッグサーフェスを介した質量流量の一般的な時刻歴出力

```
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/TH/SURF/666000002
Airbag MonVol Time History - 666
# var1 var2 var3 var4 var5 var6 var7 var8 var9 var10
AREA MASSFLOW
# Obj1 Obj2 Obj3 Obj4 Obj5 Obj6 Obj7 Obj8 Obj9 Obj10
666000001
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---
```

カードは、/SURFで定義されたサーフェスを参照する必要があります。

エアバッグサーフェスの節点での気体圧力、密度、温度、および流体速度のアニメーション出力には、Engineファイルで次のカードが定義されなければなりません。

```
/ANIM/NODA/Pまたは/H3D/NODA/P
/ANIM/NODA/DENSまたは/H3D/NODA/DENS
/ANIM/NODA/TEMPまたは/H3D/NODA/TEMP
/ANIM/VECT/FVELまたは/H3D/NODA/FVEL
```

時間ステップと結合制御

有限体積の時間ステップと数は、エアバッグシミュレーションモデルの実行時間に影響を与えます。本セクションでは、有限体積の時間ステップと数の影響のために用意されているオプションについて説明します。

有限体積の時間ステップは初期メッシュに基づいており、次のように計算されます：

$$\Delta t_{fv} = \Delta T_{sca} \cdot \left(\frac{l_c}{v+C} \right) \quad (270)$$

ここで、

ΔT_{sca} /DT/FVMBAG/1、/MONVOL/FVMBAG1、または/MONVOL/FVMBAG2で入力される時間ステップスケールファクター

l_c 初期有限体積テトラメッシュの最小エッジ長である特性長

v 最大気体速度

C 最大音速

特性長は、初期FVメッシュに基づきStarter内で計算され、シミュレーション中に変化はしません。Polyhedra出力は、推奨されなくなっているKmesh=1メッシュ生成法用です。“NUMBER OF ADDITIONAL BRICKS”の後ろにリストされている最小長情報は自動メッシュ生成Kmesh=14、もしくは有限体積がHyperMeshで手動により生成されている際のためのものです。

```
FVMBAG: FINITE VOLUME MINIMUM LENGTH
-----
VOLUME NUMBER 666000001
TOTAL NUMBER OF FINITE VOLUMES... . = 30610
NUMBER OF POLYHEDRA . . . . . = 0
MINIMUM LENGTH USED FOR TIME STEP. . . = 0.00000000000000
MINIMUM LENGTH BASED ON VOLUME . . . . = 10000000000.00
MINIMUM LENGTH BASED ON NODAL DISTANCE . = 1.000000000000000E+15
NUMBER OF ADDITIONAL BRICKS. . . . . = 30610
MINIMUM LENGTH BASED ON VOLUME . . . . = 0.7039415515349
MINIMUM LENGTH BASED ON NODAL DISTANCE . = 0.5268862297298
MINIMUM LENGTH BASED ON VOLUME/AREA. . . = 4.9347603553545E-02
```

気体の動きはないため、初期時間ステップは、特性長を室温における空気の音速で割ったものとなります。注入が始まると、気体速度と気体の音速は増大し、時間ステップは通常、エアバッグの始動時間後の短い期間の間、減少します。この期間、時間ステップは構造の目標時間ステップより少なくなる可能性があり、これにより、実行の時間ステップを制御します。しかしながら、ある時間(通常5-10ms)以降は気体速度は低下し、時間ステップは構造の時間ステップより大きくなります。エアバッグの時間ステップがシミュレーション内で一番小さい時間ステップとなるよう、時間の長さを最小にすることが重要です。

特性長は、折り畳まれたエアバッグの最小エッジ長に基づくため、シミュレーションでは低く見積もられます。したがって、時間ステップは $DT/FVMBAG/1$ 内で ΔT_{sca} の値を1以上にすることによって大きくできます。

2017.2.4以降、モデル内で/MONVOL/FVMBAG1が使用されている際は、FVM時間ステップはデフォルトで出力されます。それより古いバージョンでは、/TH/MONV内で変数DTBAGが定義される必要があります。

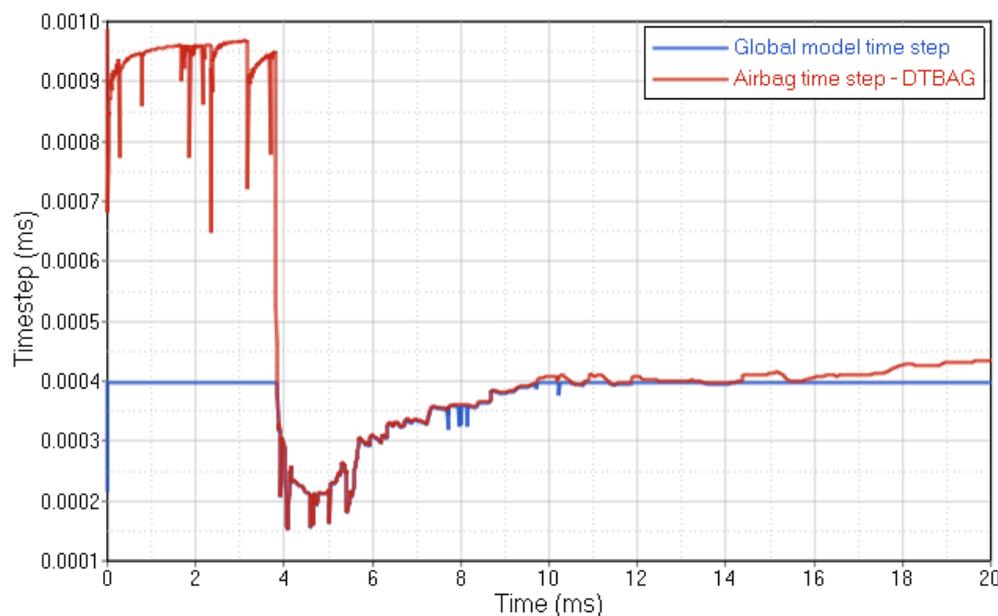


図 377: FVMエアバッグを含むモデルの典型的な時間ステップ展開 (赤色は全体時間ステップ、青色はFVM時間ステップ)
FVMエアバッグは、3.75msから7.5msで時間ステップを制御します。

シミュレーション中、有限体積は以下の手法を用いて結合されます:

- 安定性結合：デフォルトの結合手法。体積が負になると、有限体積は常に結合されます。
- グローバル結合：有限体積は、全有限体積の平均体積(エアバッグの体積を有限体積の数で割ったもの)を係数 $Cgmerge$ に掛けたものより小さい場合に結合されます。パラメータは、/FVMBAG/MODIF、または/MONVOL/FVMBAG1、/MONVOL/FVMBAG2で指定されます(2019.1以降)。
- 近傍結合：有限体積は、その体積が近傍の有限体積の平均体積に $Cnmerge$ を掛けた値より小さくなった場合に結合されます。パラメータは通常/FVMBAG/MODIFカードで指定されます。この種の結合は制御が難しいため、推奨されません。
- 時間ステップ結合：有限体積は、/DT/FVMBAG/1または/MONVOL/FVMBAG1、/MONVOL/FVMBAG2カードで定義された時間ステップ < dtminの場合に結合されます(2019.1以降)。

有限体積の数は、シミュレーション中に素早く減少します。ただし、有限体積の数が順調に減少し、シミュレーションの最後で有限体積が十分な数(最初の数の1%から10%)になることが重要です。有限体積の結合を制御する最も簡単な方法は、 $Cgmerge$ オプションの調整です。通常、値は0.01から0.1まででなければなりません。

Radiossはシミュレーションの最後に有限体積の最終数と結合された有限体積の数を出力します。

```
** FINITE VOLUME          24 MERGE STATISTICS **
NUMBER OF REMAINING FINITE VOLUMES .....: 6999
GLOBAL MERGE .....: 22730
NEIGHBORHOOD MERGE .....: 0
STABILITY MERGE .....: 885
TIME STEP MERGE .....: 2
```

FVMから均等圧力(UP)アプローチへの切り替え

/MONVOL/FVMBAG1および/MONVOL/FVMBAG2 T_{switch} パラメータは、FVMからUP計算に切り替えるために使用できます。UP計算はコストが少なく済むため、シミュレーション時間を節約します。この切り替えは、エアバッグの内側の圧力が安定する(局所的に計測された圧力が平均圧力と等しくなる)時点で行われるべきです。

安定実行

正しい材料、特性、接触定義、および指定された参照形状を使用する折りたたまれたエアバッグモデルは、インジェクターがアクティブになるまで動かないようにする必要があります。

安定性を確認するには、/MONVOL/FVMBAG1により参照されている/SENSOR/TIMEで $T_{delay} DELAY=50ms$ に設定し、50msの終了時間までシミュレーションを実行します。エアバッグモデルは、TTFまでに応力、ひずみ、および非物理的な動きが大幅に増加することがないようにする必要があります。動きや応力がある場合は通常、接触または参照形状の何らかの問題に起因しています。TTFまでエアバッグが動かないようにするために、追加の減衰/DAMP、接触アクティブ化、エアバッグモデルの硬質化を使用しないでください。

エアバッグハウジングおよびインフレーターコンポーネントは、エアバッグとこれらのコンポーネントとの間の接触定義と共に安定実行に含まれていなければなりません。

一定圧力実行

一定圧力実行は、気体動的データ、インジェクター入力、繊維材料、および接触が物理的な結果をもたらすように実行する必要があります。

一定圧力試験を作成するには:

- /MONVOL/FVMBAG1を/MONVOL/AIRBAG1キーワードで置き換えます。
- インジェクターサーフェスをインジェクター定義から削除します
- インジェクターの速度曲線入力をコメントアウトします

- すべてのベントを有限体積エアバッグ内と同様に保持します
- 有限体積バッグメッシングのための入力が含まれている情報行をコメントアウトします

/MONVOL/FVMBAG1の/MONVOL/AIRBAG1への変換

```

#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/MONVOL/AIRBAG1/1
SAB
#      Isur
#      4
#      Ascale_T      Ascale_P      Ascale_S      Ascale_A      Ascale_D
#      0              0              0              0              0
#      Mat_ID      Pext      T_0      Iequi      Ittf
#      5000      1.0135E-4      296
#      Njet
#      1
#inject_ID      sens_IDsurf_IDinj
#      10001      22      19
#      10001      22
##fct_IDvel      Fscalelevel
#      4              0
#      Nvent
#      0
##      Iframe
#      0
##      11      12      13
#
##      Nb1      Nb2      Nb3grbric_ID surf_IDin      Iref
#      0      0      0      21      20      0
##      Igmerg      Cgmerg      Cnmerg      Ptole
#      1      1e-04      1e-04      0
##      qa      qb      Hmin
#      0
##      Ilvout      Nlayer      Nfacmax      Nppmax      ifvani
#      0      0      0      0      1
/SURF/PART/4
AIRBAG EXTERNAL SURFACE
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|

```

シミュレーションの結果は、現実的なエアバッグ展開、動かない節点やハンギング節点(接触交差による)がないこと、時間ステップの進展、エネルギーバランス、およびエネルギーエラーを制御するために視覚的に確認する必要があります。

エアバッグのパラメータ、質量、体積、圧力、および温度はプロットし、指定したエアバッグ体積および注入した気体の物理的スペックの質量と比較する必要があります。

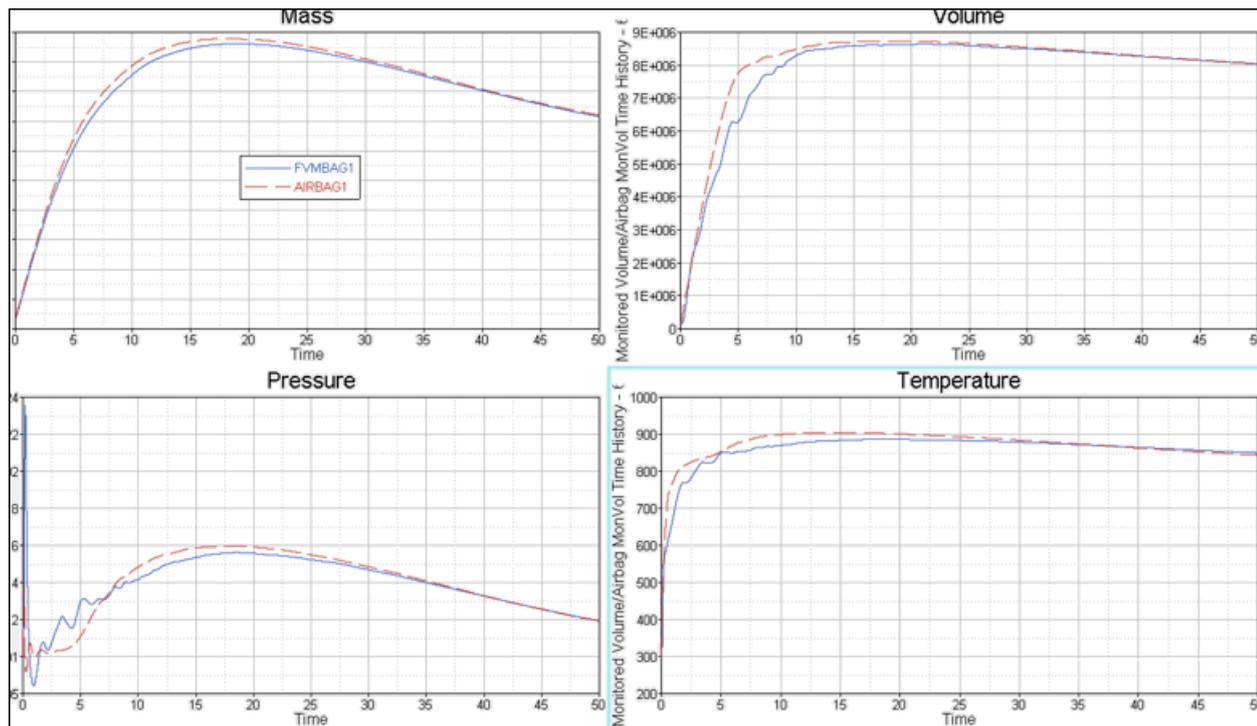


図 378: /AIRBAG1実行で制御するエアバッグパラメータ

各ベントについて、ベント面積およびベント流出はプロットされ、エアバッグ内の実際のベントホールの物理サイズと比較される必要があります。

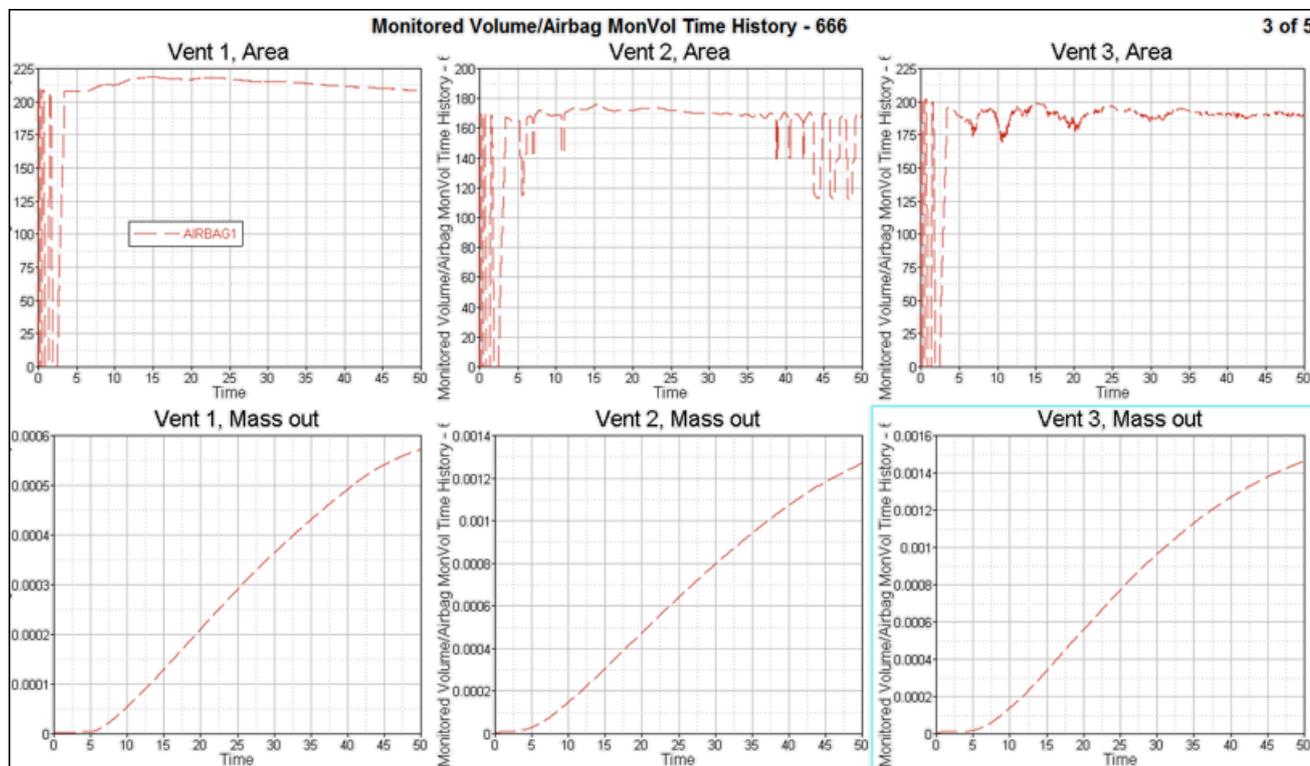


図 379:

このデータを比較の基礎として使用し、/MONVOL/FVMBAG1シミュレーションからの気体の平均動的データと比較する必要があります。

FVMエアバッグのスタンドアロン実行

FVMエアバッグは、正しい展開挙動およびエアバッグ特性を検証するため、スタンドアロンで実行する必要があります。有限体積マージパラメータおよび時間ステップの制御は、解析時間を短縮し、一方で現実的な結果を与えるよう修正することが可能です。

典型的な有限体積パラメータは、Engineファイルで次のように入力されます(2019.1より、/MONVOL/FVMBAG1、/MONVOL/FVMBAG2カードにも追加可能)：

```
/DT/FVMBAG/1
1.5 1.0e-05
/FVMBAG/MODIF
666000001
1 0.010 0.001 1
```

解析の最後における正しい有限体積の数と時間ステップを提供するために、時間ステップのスケール係数と全体マージパラメータの調整が必要です。

有限体積の数、および有限体積時間ステップは、HyperGraphでプロットできます。

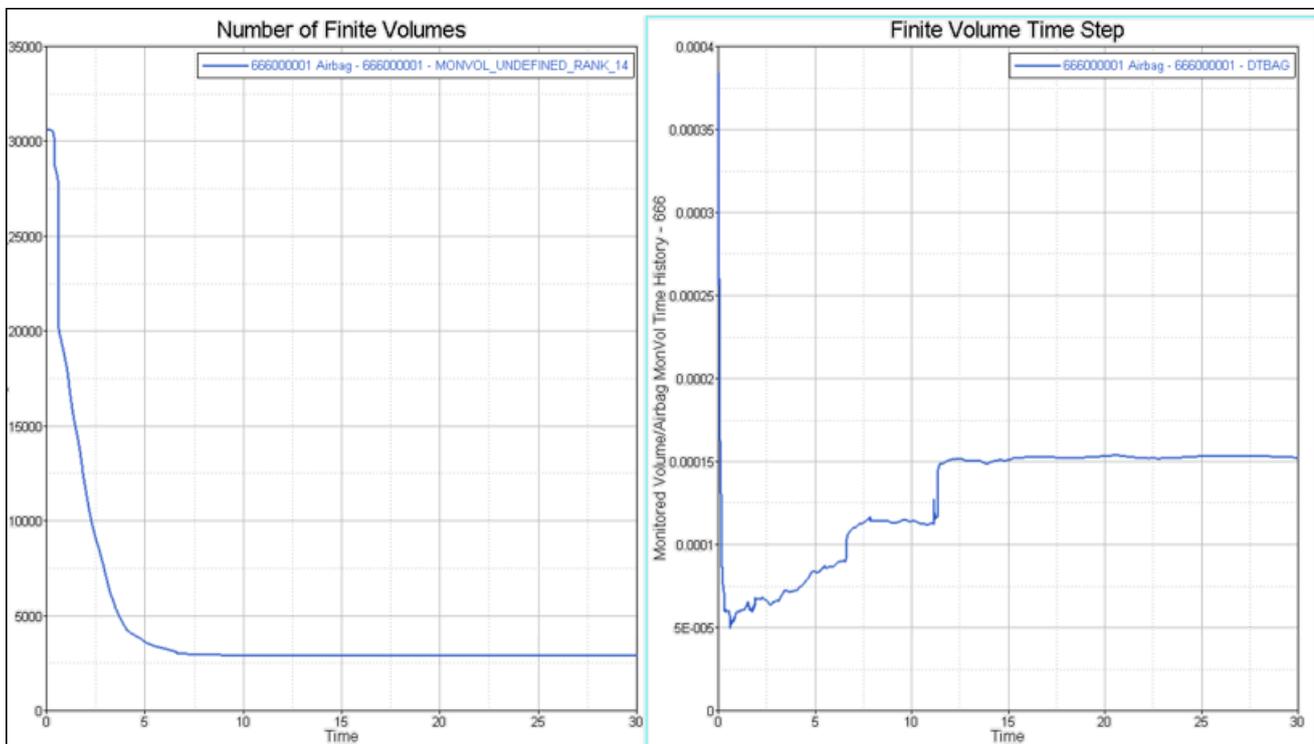


図 380:

有限体積の数は、有限要素の初期数の2%から10%にスムーズに減少する必要があります。マージストラテジーでは、衝突シミュレーションで必要となる最小時間ステップよりも大きい時間ステップを提供する必要もあります。

有限体積のマージは、Engine出力ファイルで確認しなければなりません。

```
2 0.6688E-03 0.2863E-03 FVBAG 666000001 0.0% 2.739 0.1415E-14 0.000 -0.8103E-19
0.000
** MONITORED VOLUME ID: *****TIME STEP: 0.2878E-03 FINITE VOLUME: 21940

** MONITORED VOLUME ID: ***** - FINITE VOLUME MESH UPDATE **
NUMBER OF FINITE VOLUMES : 30605
SUM VOLUME FINITE VOLUMES : 155386.459 (VOLUME AIRBA 155386.459 )
SUM AREA SURFACE POLYGONS : 227440.887 (AREA AIRBAG 227440.887 )
```

妥当な数の有限体積が必要であり、有限体積マージ処理によってその数がすぐに1つの有限体積まで減少することにならないようにする必要があります。

/DT/FVMBAGカード内の有限体積時間ステップは、Starter出力での初期有限要素時間ステップの出力よりも小さくする必要があります。/FVMBAG/MODIFにおけるマージパラメータCgmerglは、有限体積のマージ過程がスムーズになるよう、あまり高くないようにする必要があります。

有限体積の合計の体積は、次のように実際のエアバッグ体積と等しくなる必要があります。

```
** MONITORED VOLUME ID:          1 - FINITE VOLUME MESH UPDATE **
NUMBER OF FINITE VOLUMES :      1565
SUM VOLUME FINITE VOLUMES :    298121.912          (VOLUME AIRBA 298121.912)
SUM AREA SURFACE POLYGONS :    230093.158          (AREA AIRBAG  230093.158)
```

有限体積がマージされるたびに、Engine出力でこのメッセージが表示されます。

```
44  0.1320      0.2865E-02 FVBAG      1  1.0%  7.222      0.1104      0.000      0.4265E-01
0.000
** MONVOL ID      1 FINITE VOLUME MESH UPDATE - LOOPING - NUMBER OF FINITE VOLUMES :      1564
** MONVOL ID      1 FINITE VOLUME MESH UPDATE - LOOPING - NUMBER OF FINITE VOLUMES :      1563
** MONITORED VOLUME ID:      1TIME STEP:  0.4293E-02 FINITE VOLUME:      396
```

エアバッグ内の気体の動きは、気体の温度と速度のアニメーション出力をコンタープロットすることで確認する必要があります。この動きは、インフレーターからエアバッグ体積へと明白に展開され、エアバッグトポロジー（内壁、パッフル、ベントホールなど）を考慮しなければなりません。

エアバッグの気体パラメータは、一定圧力のエアバッグの実行と比較する必要があります。重要な相違点を調べ、原因を明らかにする必要があります。

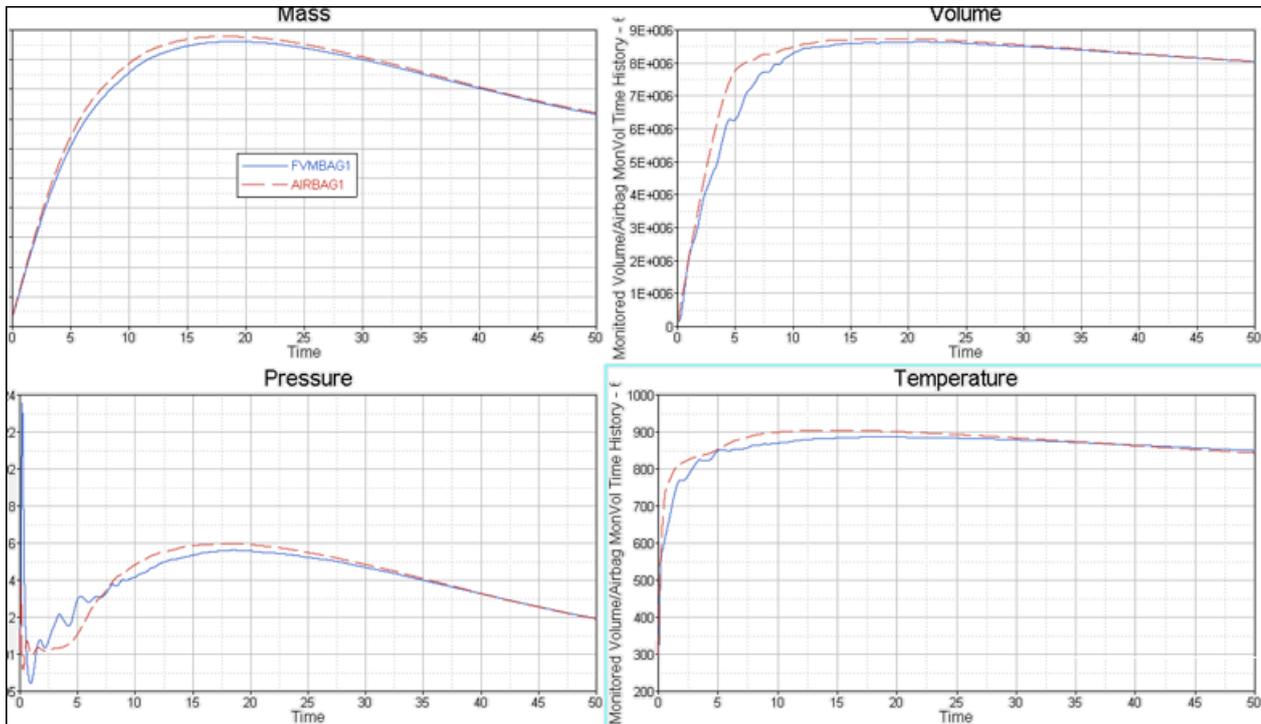


図 381: AIRBAG1およびFVMBAG1シミュレーションのエアバッグ出力の比較

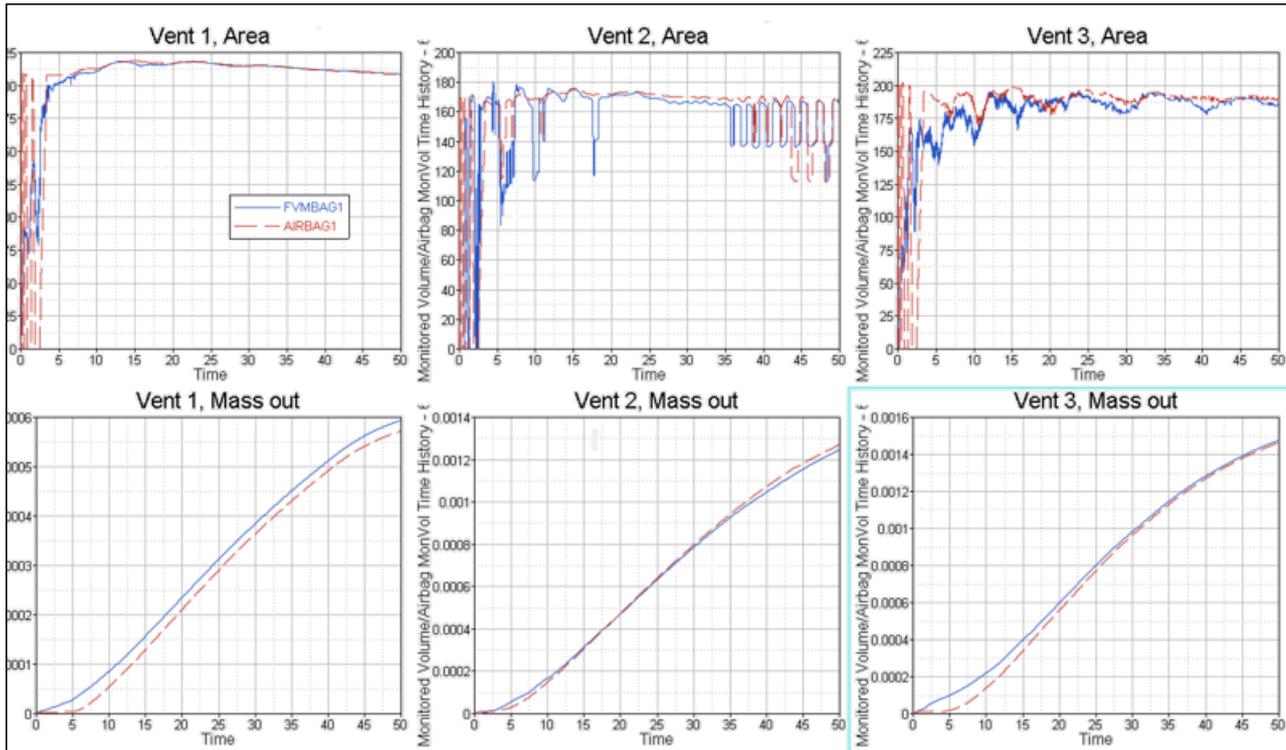


図 382: AIRBAG1およびFVMBAG1シミュレーションの排気パラメータの比較

ベント面積およびベント流出は、ベントごとにプロットし、制御して、一定圧力実行と比較する必要があります。

不正な体積の排除

FVMの計算では、初期のテトラ形状はあまり重要ではありません。体積は、FVM時間ステップ定義のCmerge全体マージパラメータとTscaleパラメータIに従って近傍の体積とマージされます。

チェックリスト

エアバッグモデリングに役立つチェックリスト:

- すべてのエアバッグ繊維コンポーネントがメッシュ要件(3-4mm平均サイズ)に従ってメッシュ処理されている
- エアバッグに交差がない
- エアバッグが大きなシミュレーションで使用される場合は、エンティティIDの番号付けが大型モデルの要件に基づいて正しい
- エアバッグモデルがエアバッグ外部サーフェス、ベント、内部サーフェス、ハウジング、インフレーターを表す/SUBSETに細分されている
- モデルの質量および慣性が、物理パートと対応している
- 繊維材料データが2軸試験、額縁試験および単軸試験を用いて検証されている
- ベントホールがモデル化されている
- 多孔繊維がモデル化されている
- 各気体コンポーネントの気体材料がモデル化されている
- インフレーターが、タンク試験シミュレーションを使用し、質量流量および温度曲線をそのタンク試験結果と比較して検証されている

- 気体注入が、質量流量および温度曲線によってではなく、 $/SENSOR T_{delay}DELAY$ で定義されているTTFにおいて開始する
- 質量流量曲線が非ゼロ値から始まる
- $C_p(T)$ 関数が気体ごとに単調に増加している
- 参照形状は、節点ベース($/XREF$)または要素ベース($/EREF$)の形状として表す必要がある
- 注入をアクティブ化し、LAW58で参照形状をアクティブ化するために、同じ $/SENSOR$ が使用されている
- 周囲および内部エア材料のプロパティが指定されている
- FVMBAG1またはFVMBAG2カードのいずれかが指定される
- 内部エアバッグ接触が定義され、HyperCrash貫通チェックで交差がないことが示されており、最大貫通量が接触ギャップの10%である
- TTFの前に安定実行が行われ、動きがチェックされている
- 一定圧力実行が完了しており、接触節点のアンカーなし
- スタンドアロンのFVM実行が完了しており、接触節点のアンカーはなく、展開が現実的
- 必要な時間ステップでモデルが実行される
- 有限体積の数が1つに減少していない
- 流れの視覚的展開(温度コンタープロット、流体速度ベクトル)が現実的である

タンクテスト

タンクテスト出力からのデータを使用することにより、Radiossへの入力として使用できる、供給されるガスの温度とマッフローを得ることができます。

タンクテストで、インジェクションの点とタンク中央の点で圧力の計測が可能で、それらが等しければ、圧力変化を得ることができます。また、供給されるガスの量と、テストでのガスの特性も得られます。

温度については、温度計の精度が十分でないことが多いため、正確なテストデータを取得することがより困難です。そのため、タンクテストの温度が間違っている可能性があります。

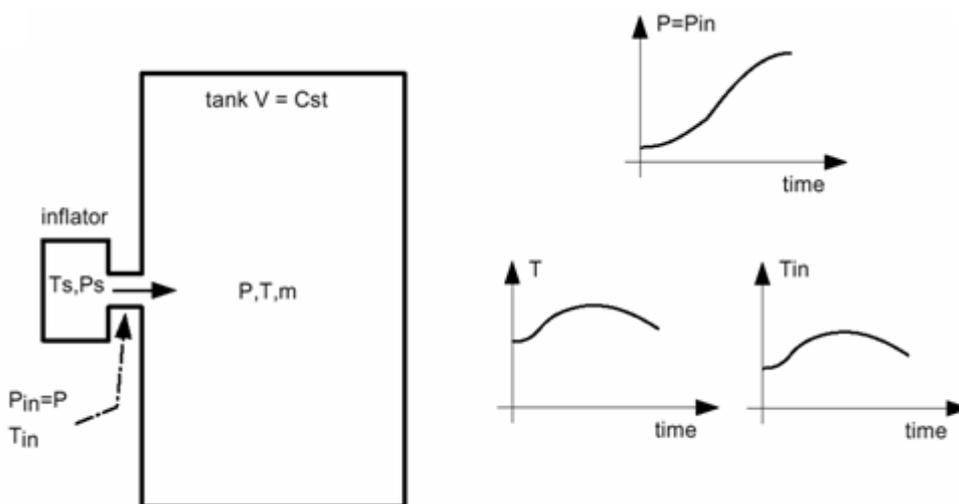


図 383: 未知の質量流量

以下は、注入温度とタンク内の温度が既知の場合と未知の場合があることを考慮に入れたケースになります。

インジェクターとタンクの温度が未知のケースでは:

- 初期と注入ガス組成

それぞれの要素のモル質量 (MW_i) とモル分率 (X_i) が既知であればガスのモル質量 (MW) を定義することが可能です:

$$MW = \sum X_i \cdot MW_i \quad (271)$$

ガスの混合体の単位体積当たりの平均熱容量はAmagat-Leduc方程式で与えられます:

$$C_p(T) = \frac{\sum m_i \cdot C_{pa}}{\sum m_i} + \frac{\sum m_i \cdot C_{pb}}{\sum m_i} T + \frac{\sum m_i \cdot C_{pc}}{\sum m_i} T^2 \quad (272)$$

前の式を用いて、初期状態と注入された混合体の熱容量係数 ($C_p(T)$) の定義が可能な場合があります。

注入されたガスの特性が既知であれば、初期のガスと混合体のマスフローとインジェクターの温度を見つける事が可能です。以下の基礎方程式が解析の実行に用いられます。

- 理想気体の状態方程式は:

$$PV = nRT, \quad n = \frac{m}{MW} \quad (273)$$

ここで、 $R = 8.314 \frac{J}{mole \cdot K}$

- 断熱の方程式は:

$$H = const. \quad (274)$$

ここで、 H は系の全エンタルピー (インフレーター + タンク) です。

エネルギー保存から、タンクテストの基礎のエネルギー方程式は次のように書くことができます:

$$dE_{airbag} = -PdV + dH_{in} - dH_{out} \quad (275)$$

ここで、タンクテストは断熱的であるため、 $dH_{out} = 0$ となります。タンクテストの一定体積は、 $dV = 0$ を意味します。

したがって、式 275 は下記のように要約することができます:

$$U_f - U_0 = dH_{in} \quad (276)$$

$$\Leftrightarrow \int_0^{T_{mix}} m_{(in+air)} \cdot C_{V(in+air)} dT - \int_0^{T_{air}} m_{(air)} \cdot C_{V(air)} dT = \int_0^{T_{in}} m_{(in)} \cdot C_{P(in)} dT$$

$$\left(C_{pa(air)} + C_{pb(air)} \frac{T_0}{2} + C_{pc(air)} \frac{T_0^2}{3} - \frac{R}{MW_{air}} \right) = m_{(in)} T_{in} \left(C_{pa(in)} + C_{pb(in)} \frac{T_{in}}{2} + C_{pc(in)} \frac{T_{in}^2}{3} \right) + m_{(mix)} T_{mix} \left(C_{pa(mix)} + C_{pb(mix)} \frac{T_{mix}}{2} + C_{pc(mix)} \frac{T_{mix}^2}{3} \right)$$

インフレーター温度

式 276 で、未知の変数は T_{in} のみです。

他の変数は既知であるか、または式 272 と式 273 を用いて決めることができます:

- $m_{(in)} m_{(air)} = MW_{air} \frac{P_0 V}{RT_0}$ および $n_{(mix)} = \frac{m_{(in)}}{MW_{in}} + \frac{m_{(air)}}{MW_{air}}$
- $i = a \sim c$ の場合: $C_{pi(in)}, C_{pi(air)}, C_{pi(mix)}$ は、式 272 を使用して計算されます。および

$$\frac{dm}{dt} = \frac{V}{\gamma(\gamma-1)C_V T^2} \left(T \frac{dP}{dt} - P \frac{dT}{dt} \right) \text{ または } m = \frac{PV}{(\gamma-1)C_V T}$$

$$T_{in} = \frac{T^2}{\gamma} \left(\frac{\frac{dP}{dt}}{T \frac{dP}{dt} - P \frac{dT}{dt}} \right) \text{ or } T_{in} = \frac{T}{\gamma} + \frac{m}{\gamma} \frac{dT}{dm}$$

3. タンク内の温度が一定の場合:

$$T_{in} = \frac{T}{\gamma}$$

エアバッグのセットアップに関する推奨事項

エアバッグの材料

LAW19を使用した繊維材料モデルのセットアップに関する推奨事項。

LAW19のオプション	推奨値	推奨オプションの詳細
R_E	$0.001 < R_E < 0.01$	R_E を0.01より大きくすると圧縮剛性が高くなりすぎます。
ZeroStress	1	エアバッグの予ひずみは正しく適用されます。
sens_ID	/MONVOLカードで使用するセンサーと同じセンサーを使用	参照形状による繊維の予ひずみは、TTF時点でアクティブにする必要があります。

LAW58を使用した繊維材料モデルのセットアップに関する推奨事項。

LAW58オプション	推奨値	推奨オプションの詳細
B_{11} と B_{22}	> 0	B_{11} と B_{22} の値は正数とする必要があります。
Flex	0.01	デフォルト値で十分です。
$G_0 < G_T$	--	せん断パラメータは一定とする必要があります。
α_T	度単位の値を入力します	せん断ロック角度を度単位で入力する必要があります。
ZeroStress	1	エアバッグの予ひずみは正しく適用されます。
sens_ID	/MONVOLカードで使用するセンサーと同じセンサー	参照形状による繊維の予ひずみは、TTF時点でアクティブにする必要があります。

エアバッグのプロパティ

繊維プロパティ/PROP/TYPE9 (SH_ORTH)および/PROP/TYPE16 (SH_FABR)における推奨事項。

プロパティのオプション	推奨値(材料別)		推奨オプションの詳細
	LAW19 ²⁵	LAW58 ²⁶	
I_{sh3n} SH3N(三角形要素の場合)	2	2	これはデフォルトの三角形要素定式化です。
I_{smstr} SMSTR(三角形要素の場合)	1	4	3節点の三角形要素で推奨のベストプラクティス
I_{shell} SHELL(4節点シェルの場合)	12	12	この定式化によってアワグラスの発生を回避できます。
I_{smstr} SMSTR(4節点シェルの場合)	11	11	4節点シェルの I_{shell} SHELL = 12と共に使用する必要があります。
N	1	1	膜を定式化できます
$Thick$	> 0	> 0	厚みを設定する必要があります
I_{plas} PLAS	0	0	繊維には適用しません
I_{thick} THICK	0	0	繊維には適用しません
V_x, V_y, V_z	ゼロではないベクトル	ゼロではないベクトル	この入力によって、1番目の直交異方性の方向を決定するベクトルを設定します。設定しない場合は、この方向として全体座標系のX軸が使用されます。
I_{dri} DRIL	0	0	繊維には適用しません

エアバッグの自己接触

すべての交差をエアバッグから除去できる場合は、/INTER/TYPE19を使用して、サーフェスどうしの接触とエッジの接触を定義できます。一部の高度なケースでは、2つの別々の接触を定義することが推奨されます。すなわち、/INTER/TYPE7を使用して節点とサーフェスとの接触を定義し、/INTER/TYPE11を使用してエッジの接触を定義します。

インターフェースのオプション	TYPE7、TYPE11、TYPE19 接触での推奨値	コメント
交差	交差なし	交差は許可されていません。
貫通	貫通がギャップの95%未満であること	ギャップの95%を超える貫通はすべて除去する必要があります。
I_{stf} STF	4	インターフェース剛性は、メインおよびセカンダリ剛性の最小値です。
St_{min} MIN(kN/mm)	1	柔らかすぎる接触を回避します。

インターフェースのオプション	TYPE7、TYPE11、TYPE1 接触での推奨値	コメント
$I_{del}DEL$	0	エアバッグの自己接触には適用しません。
$I_{gap}GAP$	0	$Gap_{min}min$ で定義した一定値のギャップが使用されます。
$Gap_{min}min$	1.0 mm	TYPE11の場合は、 $Gap_{min}min = 0.9mm$ を使用します。
$InactiINACTI$	6	接触ギャップを小さくすることによって、初期貫通を自動的に除去します。
$Fric$	0	エアバッグの自己接触では摩擦を使用しません。
$I_{bag}BAG$	1	接触時にベントホールと多孔繊維をブロックします。

交差を除去できない場合は、以下の推奨値を指定した/INTER/TYPE23を使用できます。

インターフェースのオプション	TYPE23での推奨値	コメント
貫通	貫通がギャップの95%未満 であること	ギャップの95%を超える貫通はすべて除去する必要があります。
$I_{stf}STF$	4	インターフェース剛性は、メインおよびセカンダリ剛性の最小値です。
$I_{del}DEL$	0	エアバッグの自己接触には適用しません。
$I_{gap}GAP$	0	$Gap_{min}min$ で定義した一定値のギャップが使用されます。
$Gap_{min}min$	繊維材料の厚み	この値によって、接触ギャップと接触の深さの両方が決定されます。この値が大きすぎると、接触が深すぎるために、交差した節点が解放されなくなります。
$InactiINACTI$	6	接触ギャップを小さくすることによって、初期貫通を自動的に除去します。
$Fric$	0	エアバッグの自己接触では摩擦を使用しません。
$I_{bag}BAG$	1	接触時にベントホールと多孔繊維をブロックします。

25. 繊維の材料則LAW19は、/PROP/TYPE9 (SH_ORTH)でのみ使用できます。

26. 繊維の材料則LAW58は、/PROP/TYPE16 (SH_FABR)でのみ使用できます。

エアバッグ展開のデバッグ

ここでの目的は、エアバッグが適切に展開しないシミュレーションや、エアバッグが原因でクラッシュするシミュレーションのトラブルシューティング方法に関するガイドラインを提示することです。

さまざまな理由により、エアバッグが適切に展開しないことや、エアバッグが原因でシミュレーションがクラッシュすることがあります。ここでは、多く見られる問題を取り上げます。

単位系

各種パーツの密度と係数を調べ、それらが同じ単位系に基づいていることを確認します。たとえば、プラスチックパーツと金属パーツのヤング率が次の範囲に収まっている必要があります。

$$0.01\text{GPa} < E < 210\text{GPa}$$

これらの値を確認するには、HyperCrashの**Quality**プルダウンメニューにあるコンター確認機能を使用します。

誤った接触定義

接触の欠落

エアバッグが展開時に引っかかることや固着することを防止するには、以下の接触を定義します：

- サーフェスとエッジとの接触に対するエアバッグの自己接触。
 - TYPE19
 - サーフェスとエッジとの接触にさまざまな設定が必要なモデルに対する代替手法としてTYPE7 + TYPE11を定義
 - 接触については[エアバッグのセットアップに関する推奨事項](#)をご参照ください
- エアバッグと環境との接触 (IPやステアリングホイールなど)
 - TYPE7: エアバッグはセカンダリ、環境はメイン
 - TYPE7対称接触: 環境はセカンダリ、エアバッグはメイン
 - TYPE11: エアバッグはセカンダリ、環境はメイン
 - 代替手法は、エアバッグをセカンダリ、環境をメインとした単一のTYPE19を定義することです
 - 破壊を定義している場合は、 $I_{del}DEL=1$ (臨界) と設定します

貫通と交差

交差はバッグの適切な展開を妨げるため、取り除く必要があります。バッグの自己衝撃接触で交差が発生しないこと、バッグと環境との間にも交差が発生しないことが必要です。交差を確認するにはHyperMeshまたはHyperCrashを使用します。

貫通は、折り畳んだエアバッグの自己接触で多く見られます。貫通がまったく発生しないことが理想的です。フラグ *Inacti* $INACTI=6$ を設定すると、ギャップが自動的に狭くなり、貫通による初期接触力の発生を防止できます。ただし、ギャップが自動的に狭くなった後も、適切なギャップが残っている必要があります。したがって、最大貫通量は接触ギャップの95%未満とする必要があります。貫通を確認するには、HyperCrashまたはHyperMeshの貫通チェックツールを使用します。

センサーと参照形状

エアバッグへの注入開始時間 (TTF) を設定するセンサーの `/MONVOL sens_ID` を、材料則 LAW19 または LAW58 の `sens_ID` でも参照する必要があります。このセンサーを使用すると、参照形状をアクティブにする時期をソルバーで認識できます。

同じsens_IDを使用しないと、エアバッグが展開してから数ミリ秒後に誤った挙動が発生し、エアバッグが非現実的な変形に至ることがあります。

誤った材料

エアバッグの材料で推奨値を確認します。

誤ったプロパティ

エアバッグの形状は非常に複雑であるため、三角形要素(3節点シェル)も多用します。エアバッグに使用するプロパティの推奨値は次のとおりです:

- /PROP/TYPE9(LAW19の場合)
 $I_{sh3n}SH3N=2, I_{smstr}SMSTR=1, N=1$
- /PROP/TYPE16 (LAW58の場合)
 $I_{sh3n}SH3N=2, I_{smstr}SMSTR=4, N=1$

誤った参照形状

最初の数サイクル後にシミュレーションで障害が発生し、初期内部エネルギーがきわめて大きくなる場合は、参照形状が誤っているか破損していることが原因として考えられます。参照形状はHyperCrashで表示できます。エアバッグにすべての要素が存在し、これらの要素の形状が歪んでいないことを確認します。

展開から50ミリ秒後のエアバッグ表面が滑らかではない場合(図 385)、エアバッグのすべてのパートに参照形状を定義していることを確認します。

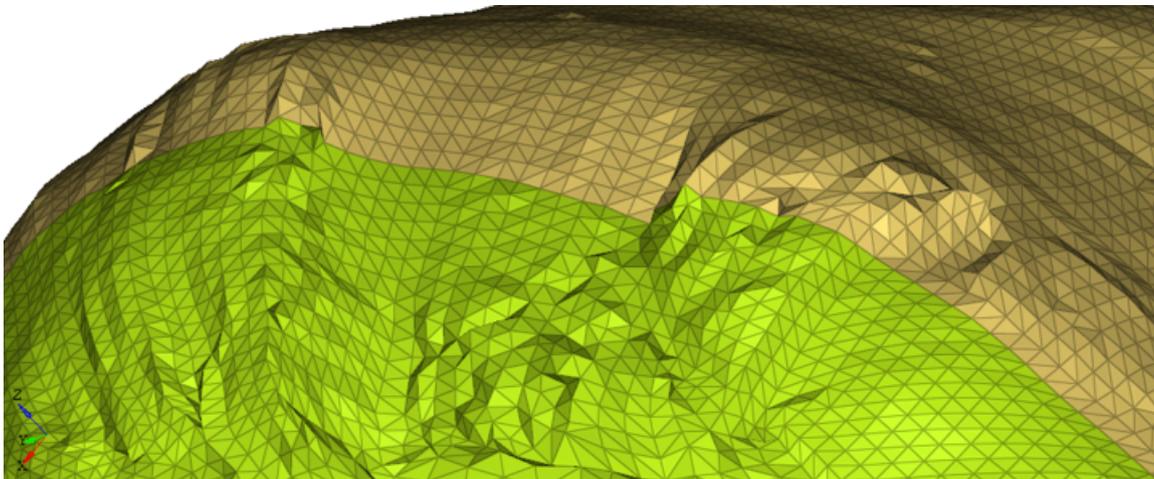


図 385:

誤った境界条件 / 初速度

エアバッグのキャニスターに適用している境界条件があるかどうかを確認します。そり / フルビークルのシミュレーションでは、このような境界条件によって、エアバッグが車両と共に移動できないことがあります。そのような境界条件は、別のエアバッグモデルシミュレーションで使用されたものであることが考えられます。

初速度を伴うそりのケースを実行する場合は、エアバッグが存在することを必ず確認します。そのためにお勧めできる手法として、車両のみを表示し、すべての節点の初速度が $t=0$ の時点で0より大きいことを確認します。

ボイド材料を使用したパート内の内部節点

ボイド材料を割り当てたパートには、内部節点が存在しないことが必要です。ボイド材料には剛性がないからです。ボイド材料は、連結サーフェスやベントを定義するために使用することがあります。

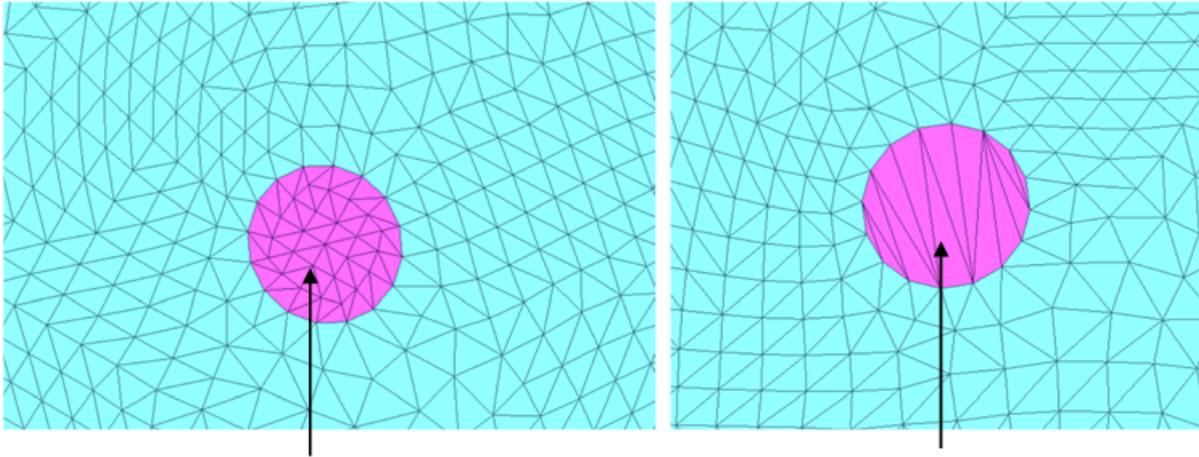


図 386: 左図:内部節点がないボイド材料、右図:不適切なボイド材料に存在する内部節点

誤った法線方向

モニター体積の場合、サーフェスを定義しているすべてのセグメントの法線が外側を向いている必要があります。そうでない場合は、ソルバーからStarter出力ファイルにエラーメッセージが出力されます。

```
ERROR ID :          8
** ERROR IN MONITORED VOLUME DEFINITION
DESCRIPTION :
  --MONITORED VOLUME ID :      6620000
  --MONITORED VOLUME TITLE :    PAB
OPEN VOLUME OR WRONG ELEMENT ORIENTATION
SOLUTION :
  VOLUME MUST BE CLOSED AND NORMALS OUTWARD-ORIENTED
```

モニター体積を定義している要素の法線をHyperCrashまたはHyperMeshで確認して、適切に調整します。

注: 参照形状を/EREFで定義している場合は、要素の法線を変更しないようにする必要があります。変更すると、参照メッシュおよび折り畳んだメッシュまたはスケーリングしたメッシュでの要素結合が切り離されることがあるからです。

要素の法線を変更するのではなく、特定のコンポーネントのサーフェスを生成する際に、法線の反転をソルバーに要求することをお勧めします。

次の例では、パートID = 1の法線をソルバーで反転しています。

```
/SURF/PART/19
Airbag
-1          2          3          5          8          9
```

エアバッグの時間ステップ、/DT/FVMBAG/1

Engineファイルに、時間ステップ処理/DT/FVMBAG/1を記述する必要があります。

例:

```
/DT/FVMBAG/1
0.9 0.0002
/FVMBAG/MODIF
#monvol_ID
```

```
2000
# igmerge cgmerge cnmerge ilvout
1 0.01000 0.001000 1
```

静的展開試験

車両モデルにエアバッグモデルを適用する前に、静的展開試験の実施をお勧めします。

この試験では以下を使用します：

- フルビークル / スレッドシミュレーションで使用する時間ステップのEngineファイルパラメータ(/DT/NODA/CST、/DT/INTER/DELなど)
- フルビークル / スレッドシミュレーションで使用するソルバーのバージョン

エアバッグが適切に展開することを確認します。付加質量、体積、圧力、気体質量、流出気体質量をチェックして、エアバッグが想定どおりに展開することを確認します。この試験でエアバッグが想定どおりに展開しない場合、フルビークルでエアバッグが適切に展開する可能性はほとんどありません。

デバッグのガイドライン

衝突モデルは一般的に複雑で非常に多くの数の要素、材料、プロパティ、スプリング、インターフェースなどからなっています。得られた数値結果が実際の挙動に合わない場合、または計算がエラーメッセージで終了した場合、モデリングの問題の原因を見つけることは簡単ではありません。トラブルが生じた際にモデルをチェックするための方法が必要です。

以下のガイドラインは主な問題の修正を手助けするガイドラインとなります、しかし全てではありません。単純化のモデリング上の仮定が用いられている複雑なモデルの修正は困難で経験のあるユーザーを必要とします。

複雑なモデルで可能性のある問題は追跡可能で、次の3ステップで解決可能です：

- 計算前
- Radioss Starter計算後
- ポストプロセッサの手助けによる、計算中と計算後

以下のセクションでデバッグの方法について記述します。

モデル準備

衝突用のAltairプリプロセッサでは、多くのモデルチェック用のツールが統合されています。これらのツールには自動修正アルゴリズムも含まれています。モデル実行前の最も一般的なチェックは次に関連します：

- メッシュ品質
- スプリング定義
- インタフェース定義での交差と貫通
- 運動条件の非適合のチェック
 - 剛体間に共通セカンダリ節点がない
 - "自由"なメイン節点のみである
 - 小さな剛体の球状慣性
- 質量と重心
- パートの板厚
- 初速度の値と方向
- 剛壁の法線
- 材料則：単位系の一貫性
- 自由節点
- モニター体積：
 - 閉じた体積
 - 正の体積
- パート間の結合
- 結合されたパート間のメッシュサイズ

ここでは、有効なモデルを生成するためのいくつかの基本的なルールについて記述します。

メッシュ品質

[有限要素のメッシュに関する推奨](#)の内容を考慮する必要があります。シェルメッシュは可能な限り一様である必要があります。与えられた物理パートに異なるシェルの定式化を用いることは推奨されません。非常に細かいメッシュに対しては、完

全積分要素または物理安定化法の使用を推奨します (/PROP/SHELL)。3角形シェルは避けるべきです。メッシュの難しさによりメッシュに3角形が含まれる場合、パートごとにその数が 5% 以下になるように減らすことが推奨されます。

材料チェック

よくある材料チェックに関する質問には、次のようなものがあります：

1. その材料は正しい単位系にありますか？

- 金属パートの場合：

$40 \text{ GPa} < \text{係数} < 210 \text{ GPa}$

$1.8\text{e-}6 \text{ kg/mm}^3 < \text{密度} < 7.8\text{e-}6 \text{ kg/mm}^3$

- 塑性パート(PP、PC-ABS、PP GF30%...)の場合：

$0.9 \text{ GPa} < \text{係数} < 13 \text{ GPa}$

$9\text{e-}7 \text{ kg/mm}^3 < \text{密度} < 1.6\text{e-}6 \text{ kg/mm}^3$

- フォームの場合：

$1\text{e-}8 \text{ kg/mm}^3 < \text{密度} < 1\text{e-}7 \text{ kg/mm}^3$

2. 材料データベースにある実証済みの材料ですか？

現実的な材料データを入力する必要があります。

3. 次に示す材料の一般的な問題について確認してください。

- 応力-ひずみ曲線の負の勾配
- 変形可能なパートに割り当てられている弾性材料
- 非現実的な降伏応力 (> 2 GPa)
- 破壊が定義されておらず、塑性パートまたは金属パートの要素が非現実的に伸張している (塑性ひずみ > 1)

上記のチェックの一部はHyperCrashで実行できます。

- 単位の一貫性は、品質パネルのコンター確認機能を使用して実行できます。
- "Part is not integrated in rbody for LAW1"チェックでは、変形可能で、変形が大きくなると不安定になる可能性のある材料LAW1を使用しているパートが検出されます。

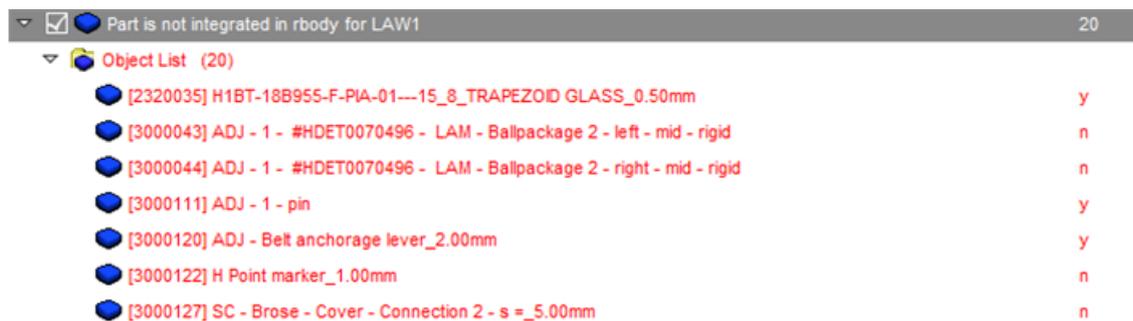


図 387:

ソリッドとシェルの定義

一部の材料では、シェルまたはソリッドで特別なオプションを使用することをお勧めします。

1. 弾塑性材料則(LAW2、LAW27、LAW36など)を使用しているパートの場合。

- $I_{shell} SHELL=24$ 、 $I_{smstr} SMSTR=4$ 、 $I_{plas} PLAS=1$ 、 $I_{thick} THICK=1$ 、 $N=5$

2. 弾塑性材料則 (LAW2、LAW27、LAW36など) を使用しているソリッドパートの場合。

- 六面体要素の場合:

$$I_{solid}SOLID=24, I_{smstr}SMSTR=4$$

- 1次テトラ要素の場合:

$$I_{solid}SOLID=1, I_{tetra}TETRA=0 \text{ または } 1$$

- 2次テトラ要素の場合:

$$I_{solid}SOLID=1$$

3. 超弾性材料 (LAW42、LAW69など) を使用しているソリッドパートの場合。

- 六面体要素の場合:

$$I_{solid}SOLID=24, I_{smstr}SMSTR=10, I_{cpres}CPRE=1, I_{HKT}HKT=2$$

- テトラ要素の場合:

$$I_{solid}SOLID=1, I_{smstr}SMSTR=10$$

4. フォームの場合:

- 材料LAW38:

$$I_{solid}SOLID=24, I_{smstr}SMSTR=10$$

- 材料LAW70:

$$I_{solid}SOLID=1 \text{ または } 17, I_{smstr}SMSTR=1 \text{ または } 11$$

- テトラ要素でモデル化されたフォームの場合、フォームは圧縮性が高いため、 $I_{tetra}TETRA$ を1に設定しないでください。

5. 繊維の場合:

- LAW19三角形要素:

$$I_{shell}SHELL=4, I_{smstr}SMSTR=1, d_m m=0.2, N=1$$

- LAW58三角形要素:

$$I_{shell}SHELL=4, I_{smstr}SMSTR=4, d_m m=0.2, N=1$$

これはHyperCrash Model Checkerでも確認できます。



図 388: LAW70

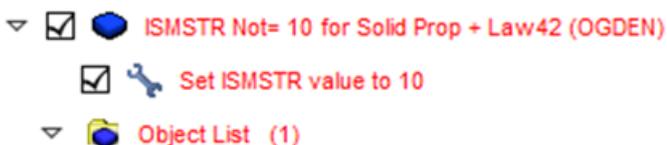


図 389: LAW42

スプリング定義

物理的ではない、または定義が不正確なスプリングは衝突モデルにおける一般的な問題です。スプリングのプロパティは質量、慣性、剛性と長さに関して一貫している必要があります。実際にスプリングは物理的な挙動をする必要があります：

- 1次元バー上の質量分布に関しては、慣性にはその上限と下限があります：

$$\frac{ml^2}{12} \leq I \leq \frac{ml^2}{4} \quad (280)$$

その下限は一様に分布した質量のバーの慣性です。上限は両端に質量 $m/2$ を持つバーの慣性です。スプリングはボルトやスポット溶接のモデル化にも使用されるため、これらの制限を超え、以下のように書くこともできます：

$$0.01ml^2 \leq I \leq 100ml^2 \quad (281)$$

- スプリングの断面積は、 $S = \frac{KI}{E}$ または $S = \frac{m}{\rho l}$ のいずれかで計算することができます。計算された2つの値の比が100を超える場合、その非一貫性の結果としてトラブルをもたらす場合があります。
- スプリングのプロパティでは、負のひずみに対しては負の力、正のひずみに対しては正の力である必要があります。そうでない場合、スプリングは計算の間にエネルギーを生成します。
- 非線形スプリングで接線剛性が負の場合、特に勾配が負のゾーンで振動し不安定を引き起こす危険性があります（エネルギー誤差が正になり増加することがあります）。
- 曲線の最大勾配（つまり最大剛性）が初期剛性よりも大きい場合、最大勾配のゾーンでの除荷が誤ったものになります（**モデル化のツール**）。
- スプリング要素の剛性が非常に高いと、時間ステップが低くなり、不安定になる可能性があります。

例えば、次のHyperCrashのチェックでは、引張(1000 kN/mm)および回転(10000 kN.mm/rad)で異常に高い剛性を持つスプリング要素を特定できます。

 注：ダミー / バリアモデルのパートで参照されているプロパティは、無視する必要があります。



図 390:

ビームの一貫性

ビームの仮定長さ / 深さ > 10に加え、一貫したビームの定義には以下が推奨されます：

$$L > \sqrt{A} \quad (282)$$

$$0.01A^2 < I_y < 100A^2$$

$$0.01A^2 < I_z < 100A^2$$

$$0.1(I_y + I_z) < I_x < 10(I_y + I_z)$$

インターフェースの交差と貫通

メッシュの初期貫通は非現実的な結合を生成します。加えて、これはロッキング状態を引き起こし、計算が失敗に終わることになります。

初期貫通はインターフェースギャップ定義によるものです。これは、非現実的で制御できない内力を引き起こし、結果として計算の最初で局所的な塑性ひずみを発生させる場合があります。構造はそのため局所的に剛性が低くなります。

Altairプリプロセッサーツールを交差と初期貫通を検知し削除するために用いることができます。初期貫通を多く含むモデルは有効であると考えられません。修正の後、いくつかの初期貫通が残っている場合、フラグ *InactiINACTI*=1を /INTER/TYPE7でアクティブにすることができます。この場合、初期貫通している節点のインターフェース剛性は非アクティブになります。

小さな初期貫通のみが残っている場合（ギャップの5%未満）、時間での可変ギャップをフラグ *InactiINACTI* =5の設定により用いることができ、これは *InactiINACTI* =1よりも優れています。

- ベストプラクティス(推奨):
 - インターフェース TYPE7、11、および19の場合:
 - $I_{stf}STF=4$, $St_{min}MIN= 1$, $I_{del}DEL = 1$ or 2 , $InactiINACTI=6$, $I_{form}FORM=2$, $Gap_{min}min \geq 0.49$
 - シミュレーションが失敗した領域に交差はありません
 - 貫通があまり深くありません (HyperCrash/HyperMeshで残留距離を確認してください)。0.1mm未満であってはなりません。
 - インターフェース TYPE2の場合:
 - メインがシェルであるか、セカンダリ節点が回転自由度を持ち、メイン節点が回転自由度を持たない場合、 $Spot_{flag}FLAG= 28$ を使用します(ソリッド)。
 - セカンダリとメインの両方が回転自由度を持たない場合、 $Spot_{flag}FLAG= 27$ を使用します(ソリッド)。
 - すべての場合について $I_{del}DEL$ を1に設定する必要があります

剛体定義

推奨事項を以下に挙げます:

- 剛体のメイン節点にメッシュの節点を使用しない
- 2つのセカンダリ節点により作成された剛体は球状慣性フラグ (/RBODYでの $I_{spher}SPHER =1$)を必ず使用
- 剛体のメイン節点はRadioss Starterでの剛体の初期化で動く可能性があることを考慮

大部分の剛体定義の問題は、Altairプリプロセッサーツールを用いて検知、修正が可能です。

運動条件の非適合

非適合条件は、オプション /PARITH/ONが用いられている場合でも、全エネルギーの増加と並列計算での結果の非再現性の問題を引き起こす可能性があります。Radioss Starterは、非適合条件の可能性を検知します。これはユーザーによって掌握する必要があります。

並列計算

オプション/PARITH/ONは、マルチプロセッサでは必ず使用します。これが無いと、問題の再現が困難になり、起きたり起きなかったりとなる可能性があります。

コメント

1. *InactiINACTI* =1の使用はモデルを柔らかくします。
2. 自由節点をインターフェースに入れてはいけません。インターフェース定義におけるサーフェス選択は、シェルとソリッド要素(またはパート)のみで行われ、節点は使用しません。

単位の一貫性

Radiossでは、どのような単位系のデータでも用いることができますが、単位の一貫性を保持することは非常に重要です。モデルの単位に一貫性がない場合、誤った結果(予期しない挙動)や計算でのエラーを引き起こすことになります。

基本的な単位

	SI			CGS	Hydro	米国	日本
長さ	m	mm	mm	cm	cm	in	mm
質量	kg	Mg(Ton)	kg	g	g	lb	kg
時間	s	s	ms	s	μs	s	ms
平面角	rad	rad	rad	rad	rad	rad	rad
温度	K	K	K	K	K	K	K
Frequency	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz
重力	9.81	9.81E+03	9.81E-03	9.81E+02	9.81E-10	386	9.81E-03

SI単位の例

SI単位の例

長さ	[m]
質量	[kg]
時間	[s]
平面角	[rad]
温度	[K]
周波数	[Hz]
回転速度	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$
面積	[m ²]
体積	[m ³]
2次モーメント(慣性)	[m ⁴]
消費	[m ²]
速度	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$

SI単位の例

加速度	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$
引張り	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$
長さ当たり質量	$\left[\frac{kg}{m}\right]$
面積当たり質量	$\left[\frac{kg}{m^2}\right]$
体積当たり質量	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
マスフロー	$\left[\frac{kg}{s}\right]$
体積フロー	$\left[\frac{m^3}{s}\right]$
運動量	$\left[\frac{kg \cdot m}{s}\right]$
Kinetic moment	$\left[\frac{kg \cdot m}{s}\right]$
慣性モーメント(I)	$[kg \cdot m^2]$
モーメント力	$[N \cdot m]$
力	$[N]$
長さ当たりの力	$\left[\frac{N}{m}\right]$
剛性	$\left[\frac{N}{m}\right]$
回転剛性	$\left[\frac{N \cdot m}{rad}\right]$
回転減衰	$\left[\frac{N \cdot m \cdot s}{rad}\right]$
ねじり減衰	$\left[\frac{kg \cdot m^2}{s \cdot rad}\right]$
粘性減衰	$\left[\frac{kg}{s}\right]$
曲げに対する減衰	$\left[\frac{N \cdot s}{m}\right]$

SI単位の例

2次体積粘性	$[Pa^2 \cdot s]$
動粘度	$[Pa \cdot s]$
運動粘性	$[\frac{m^2}{s}]$
密度	$[\frac{kg}{m^3}]$
パワー	$[W]$
エネルギー	$[J]$
エンタルピー	$[J]$
エントロピー	$[\frac{J}{K}]$
ひずみ速度	$[\frac{1}{s}]$
緩和時間	$[s]$
熱膨張	$[\frac{1}{K}]$
熱伝導	$[\frac{W}{m \cdot K}]$
熱抵抗	$[\frac{W}{m^2 \cdot K}]$
比熱(Cp、Cv)	$[\frac{kg}{s^2 \cdot m \cdot K}]$
比熱容量(Cp)	$[\frac{J}{m^3 \cdot K}]$

一貫性の検証

基本的な質量、長さ、時間を用いて、必要な他の全ての単位を得ることができます。

$$Force = Mass \cdot Acceleration = \frac{Mass \cdot Length}{Time^2}$$

$$Pressure = \frac{Force}{Area} = \frac{Mass}{Length \cdot Time^2}$$

$$Energy = Force \cdot Length = \frac{Mass \cdot Length^2}{Time^2}$$

$$Density = \frac{Mass}{Volume} = \frac{Mass}{Length^3}$$

$$Acceleration = \frac{Length}{Time^2}$$

$$Volume = Length^3$$

例えば、基本単位として[kg]、[mm]または[ms]を用いると、以下の単位の力、圧力、密度が得られます。

$$Force = \frac{Mass \cdot Length}{Time^2} = \frac{[kg] \cdot [mm]}{[ms]^2} = 10^3 \frac{[kg] \cdot [m]}{[s]^2} = [kN]$$

$$Pressure = \frac{Mass}{Length \cdot Time^2} = \frac{[kg]}{[mm] \cdot [ms]^2} = 10^9 \frac{[kg]}{[m] \cdot [s]^2} = [GPa]$$

$$Energy = \frac{Mass \cdot Length^2}{Time^2} = \frac{[kg] \cdot [mm]^2}{[ms]^2} = \frac{[kg] \cdot [m]^2}{[s]^2} = [J]$$

$$Density = \frac{Mass}{Length^3} = \frac{[kg]}{[mm]^3} = 10^6 \cdot \frac{[kg]}{[m]^3}$$

単位のチェック

プロパティカード	シエルの場合、プロパティの板厚の単位をチェック
材料カード	密度の単位のチェック ヤング率のチェック 可能ならば応力の単位のチェック
荷重	力の単位のチェック /GRAVを用いている場合、重力の単位のチェック
長さ	HyperCrashまたはHyperMeshで形状の長さの単位を測定

全ての単位は一貫してしている必要があります。

最も代表的な単位系(鋼材の例)

質量	長さ	時間	力	エネルギー	応力	密度	ヤング率	重力	降伏応力
kg	m	s	N	J	Pa	7.8e+03	2.1e+11	9.81e+00	2.06e+05
g	mm	ms	N	mJ	MPa	7.8e-03	2.1e+05	9.81e-03	2.06e+02
kg	mm	ms	KN	J	GPa	7.8e-06	2.1e+02	9.81e-03	2.06e-01

質量	長さ	時間	力	エネルギー	応力	密度	ヤング率	重力	降伏応力
Mg (ton)	mm	s	N	mJ	MPa	7.8e-09	2.1e+05	9.81e+03	2.06e+02
g	cm	micros	10 ⁷ N	10 ⁵ J	Mbar	7.8e+00	2.1e+00	9.81e-10	2.06e-06

モデル化の計装

出力と保存の頻度はポストプロセッシング用の結果が十分な情報を持つように設定する必要があります。

保存する変数

出力ファイルには、問題の原因を見つけるための十分な情報、特に、スプリング、インターフェース、および剛体などの問題となる可能性のあるエンティティに関する情報が必要です。

スプリング 全てのスプリングとビーム要素を保存(スポット溶接のスプリングは除く)

/TH/SPRING

特定のスプリング内部の力と変位を測定

例: エンジンマウント、サブフレーム固定など

インターフェース

全ての接触インターフェース(タイプ2を除く)

/TH/INTER

特定のインターフェースの力と変位を出力

例: ダミー / ベルト

剛体

特定の剛体内部の力と変位を測定

例: サブフレーム固定、エンジンマウントなど

断面、剛壁とモニター体積

全てのTH出力を保存

Radioss Engine ファイルにアニメーションファイルの変数を保存:

質量 /ANIM/MASS

節点質量変化 /ANIM/NODA/DMAS

塑性ひずみ /ANIM/ELEM/EPSP

フォンミーゼス /ANIM/ELEM/VONM

アワグラス /ANIM/ELEM/HOURG

比エネルギー /ANIM/ELEM/ENER

速度 /ANIM/VECT/VEL

接触 /ANIM/VECT/CONT

剛壁の力 /ANIM/VECT/FOPT

問題が発生した場合、これらに加えて、/ANIM/VECT/ACCと/ANIM/VECT/FINTが有用です。

 注：実行が失敗した際のアニメーションファイルを得るために、Engineファイルに/STOPオプションを用いることができます。計算がストップした場合、もう1回リスタートを実行し、最初のサイクルのアニメーションを出力します。

Radioss Starterでのモデルチェック

Radioss Starterはフォーマット行の間の一貫性をチェックし、エラーやワーニングが存在した場合、それを表示します。出力ファイル `runname_0000.out` はモデルのデバッグを手助けする有用な情報を含んでいます。

出力ファイル内の以下の内容が役立ちます：

エラーとワーニングのメッセージ

全てのエラーは修正される必要があります

修正されるべきワーニング：

- 縮退要素
- 初期貫通
- 実際に非適合な運動条件

時間ステップのチェック(要素と節点)

いくつかの要素が時間ステップを決めているでしょうか？もし少ない場合、メッシュを修正して時間ステップを最適化します。

質量と慣性のチェック

マスマスケーリングは不安定性を引き起こします。Radiossにより計算された重心をチェックするのは価値のあることです。これは実際の重心と適合しているべきです。

 注：小さな要素、ビーム、スプリング、およびスポット溶接は注意深く観察する必要があります。

計算チェック

ここではシミュレーション結果の質をチェックするための方法について記されています。計算が失敗しなかった場合でも、3つの基本的な保存則が守られていることは検証する必要があります。時間ステップの変化と結果の量的な評価はモデル化のエラーを避ける手助けとなります。

エネルギーバランス

外力の仕事を考慮に入れると、全エネルギーは一定を保つか若干減少する必要があります。スプリングバック計算の最後または初めの1回目のサイクルでは増加する可能性もあります。

Internal energy + Kinematic energy + Hourglass energy + Contact Energy + ... = Variation of the External Work

低減積分要素が用いられた場合、全アワグラスエネルギーは全エネルギーの10%より低く保たれる必要があります。そうでない場合、メッシュが再編集されるか要素に物理安定化手法が用いられるべきです。

接触エネルギーは実際の物理的なものではありません。それぞれのサブセットとパートに関して、次の制限が推奨されます：

$$\frac{E_h + E_c}{E_t} \leq 15\% \quad (283)$$

ここで、

E_h	アワグラスエネルギー
E_c	接触エネルギー
E_t	全エネルギー

Radiossで計算されるエネルギー誤差は以下のとおりです：

$$\%Error = 100 \left(\frac{E_k + E_k^r + E_i}{E_{k,1} + E_{k,1}^r + E_{i,1} + E_{wk} - E_{wk,1}} - 1 \right) \quad (284)$$

ここで、

E_k	並進運動エネルギー
E_k^r	回転運動エネルギー
E_i	内部エネルギー
E_{wk}	外部仕事量
$E_{k,1}$	初期並進運動エネルギー
$E_{k,1}^r$	初期回転運動エネルギー
$E_{i,1}$	初期内部エネルギー
$E_{wk,1}$	初期外部仕事量

誤差は、負になる、または減少する必要があります(スプリングバックのステージの最初のサイクルを除く)。誤差は計算の最後で15%より小さい必要があります(良いモデルでは5%以下です)。誤差が若干増加しても、次に減少するのは正常です。誤差が増加する場合、これは問題が起きていることを意味します。その後、計算が失敗したメッセージ共に、エラーが99.9%に達します。

質量バランス

質量が増加した場合、その変化はそれぞれのサブセットとパートで1%より小さくなる必要があります($\frac{dM}{M} < 1\%$)。質量変化が1%と3%の間の場合は、質量が増加された節点が動いているか止まっているかをチェックしてください。動いている場合、付加された質量は運動エネルギー増加をもたらします。変化が3%より大きい場合、結果はおそらく悪いものになっています。

運動量バランス

Newton則による動的つり合いがそれぞれの時間ステップの最後で満足されます。Radiossはそれぞれのサイクルでつり合い方程式を解いているので、通常、運動量バランスは満足されます。しかしながら、問題がある場合は、節点加速度とインパクト力(インターフェース、剛壁、バリアなど)とのクロスチェックは問題をより良く理解するための手助けとなります。

$$F_{wall} = \frac{Monentumvariation}{dt} \quad (285)$$

時間ステップ変化

時間ステップが減少しても、すぐに上がる場合は問題ありません。ある1サイクルから次のサイクルで急激に変化する場合は、インターフェースの剛性によるかもしれません。

時間ステップが小さいままの場合、問題が発生しています。このケースでは、時間ステップをコントロールしている節点(または要素)を見つけ、なぜ現象が起きているのかを理解してください。

変形したパートの視覚的検査

いくつかのアニメーションファイルを得た後、構造の全体の変形を物理挙動と比較することができます。変形形状を検証して以下を確認します:

- 飛んでいる節点(パート)がない
- 変形形状が滑らかである
- 隣接する要素間のコード角度が十分に小さい
- 交差がない

次の場合、良い物理挙動が得られます:

- 塑性ひずみが30%より小さい

$$\frac{E_k + E_k^r}{E_t} \leq 1\% \quad (286)$$

意味のない結果

接触力、von Mises応力、節点速度、および加速度は注意深くチェックする必要があります。値に意味がない場合(例えば、von Mises 応力 = 1 GPa)、最初に単位系の一貫性をチェックする必要があるかも知れません。詳細については、[Appendix](#)をご参照ください。

See Also

[Results Checking \(FAQ\)](#)

モデルのデバッグ

ここでは、計算上の問題の原因を見つけるためのいくつかのガイドラインについて記します。

最初に、Radioss陽解法ソルバーは高い非線形の動的問題を解くことができますが、実行が失敗しなかった場合でも計算結果は悪い可能性がある点に注意を払う必要があります。計算が最後まで進んだ場合、数値的には良い挙動であることが示されたことにはなりますが、だからといって物理的に良い応答となっているとは限りません。しかしながら、Engine出力ファイルの最後でメッセージ"Normal termination"を受け取ることは数値解法手順の検証のために必要です。

結果の妥当性は以下の条件を満足することにより検証されます:

- 数値的安定性
- 物理的挙動

- 物理的信頼性

数値的安定性はメッセージ "Normal termination" と、エネルギーと質量バランスが検証された場合は保証できません。

用意されたモデルが物理問題を本当に表現していない場合、間違った結果がもたらされる場合もあります。問題を理解するには、結果の信頼性を証明するために次の点を確認する必要があります：

- 結果は摩擦にどの程度依存しているか？
- モデルの破断現象にどの程度依存しているか？
- 結果は未知の材料パラメータにどの程度依存しているか？
- モデルが他のシミュレート困難な現象にどの程度依存しているか？

結果が与えられたパラメータに高く依存している場合、計算で高精度な値を用いるために必ず実験が行われる必要があります。

 注： 最良のモデルとは、物理パラメータの値が認識されるモデルです。

発散

発散は以下の条件が観察されたときに起こります：

- 正のエネルギー誤差 (最初のサイクルを除く)
- 15% より大きい負の誤差 (最初のサイクルを除く)
- インタフェースタイプ7での運動学的時間ステップのアクティブ化
- 剛体で与えられる時間ステップ
- 説明できない時間ステップの変化
- 質量の急速な増加

3つのタイプの発散があります：

速い発散

エネルギー誤差の増加は指数関数的となることがあります。計算は数サイクルで失敗します。

考えられる原因：

- 運動条件の非適合
- スプリングの負の剛性
- 表形式材料則の負の剛性
- タイプ2のインターフェースにおいてセカンダリ節点がメインサーフェスから離れすぎている

遅れた発散

時間ステップが小さすぎる。構造がゆがんで多くのインターフェースで高い貫通が見られる。

考えられる原因としてメッシュの品質があります。

ゆっくりした発散

最後のエラーが必ずしも発散の原因ではありません。

考えられる原因：

- 線形的な発散の場合、原因として運動条件の非適合の存在が考えられます。
- Sin関数的な発散の場合、典型的な例は、解放されたエネルギーまたは生成されたエネルギーです (例：初期貫通およびスプリング剛性関数)。

- 柔らかすぎる材料も原因となり得ます。

どの事象が問題のきっかけとなったかを見つけることは重要です。発散直前の事象をチェックすることは必要です。与えられたパートに変な挙動が観察された場合、結合されたパートと、その前の事象も調査する必要があります。

実行の問題

実行がサイクル0で止まる

データはEngine出力ファイルrunname_0001.outに出力されません。これは一般的にリスタートファイルが正しく読めなかったときの実行不具合によって生じます。

実行が数サイクルで止まる

データはEngine出力ファイルrunname_0001.outに出力されます。問題の原因は、運動条件の非適合(例: 共通セカンダリ節点を持つ剛体)あるいは材料または要素プロパティの範囲外の値のいずれかになります。しかしながら、初期貫通が原因である可能性もあります。

計算途中での実行中断

最初にディスクスペースをチェックする必要があり、次に、発散の直前と直後の挙動を調査する必要があります。時間ステップの変化とエネルギー誤差を観察する必要があります。

- 実行前のアニメーションファイルが終了します。これは、領域を特定するのに非常に役立ちます:

- 速度が範囲外の場合 (>> 100 m/s)
- 質量が追加されている
- 変形が大きすぎる(塑性ひずみを確認)
- 応力が非現実的 (> 2 Gpa)

HyperViewで、アニメーションを確認し、明らかな問題がないか視覚的に確認します:

- 速度は車両のすべての節点到適用されるわけではありません
- 誤った境界条件
- 接続がない(シートベルトが正しく接続されていないなど)
- 基本的なコンターを確認します:
 - 1 フォンミーゼス応力: 値が範囲外でないか確認します
 - 2 追加質量: 質量が非常に大きくないか確認します
 - 3 速度: 速度が非常に大きくないか確認します。多くの場合、速度が最も大きい節点または質量が多く追加されている節点は同じ領域にあります。
- T01ファイル内の点。これは、以下を特定するのに役立ちます:
 - 内部エネルギー / 運動エネルギーが急激に増加したパート。HyperGraphですべてのパートの内部エネルギーおよび運動エネルギーをプロットします(すべてのパートを時系列に入れる必要があります)。
 - グローバルなエネルギーバランスをプロットし、その発散が内部エネルギーによるものが、運動エネルギーによるものか、外部仕事力によるものかどうかを特定します。
- リストファイル(_0001.out)の最後にある情報。

たとえば、以下のケースでは、_0001.outの最後に記載されている情報は、シミュレーションが停止する原因となったモデルの領域を理解しようとする際に非常に役立ちます。

ソルバーでは以下が報告されます:

- 運動エネルギー(1)/内部エネルギー(2)が最も大きいパート
- 速度(3)/質量変化(4)が最も大きい節点

```

** RUN STOPPED : ENERGY ERROR LIMIT REACHED
178884 69.98 0.3042E-04 INTER 91 99.9% 0.2403E+06 0.6352E+08 1881. -9054. 0.2790

ANIMATION FILE: LHS_SORB_100kg_v42pt5_IPBracket_2t3TWeld_topbottomA015 WRITTEN
*** PARTS WITH HIGHEST KINETIC ENERGY
PART_ID K-ENERGY PROP_ID PROP_TYPE MAT_ID MAT_TYPE
135061 0.1089E+10 135064 1 135008 36 (1)
100848 0.1086E+10 100006 13 0 0
...
*** PARTS WITH HIGHEST INTERNAL ENERGY
PART_ID I-ENERGY PROP_ID PROP_TYPE MAT_ID MAT_TYPE
250110 0.2144E+10 250109 1 250011 36 (2)
555031 0.2144E+10 555035 1 555006 36
....
*** NODES WITH HIGHEST VELOCITY
NODE VELOCITY K-ENER MASS MASSO DM/MASSO
55526230 0.1089E+05 0.000 0.000 0.000 0.000
55526222 2881. 881.6 0.2124E-03 0.2124E-03 0.000 (3)
55525985 2673. 757.5 0.2121E-03 0.2121E-03 0.000
...
*** NODES WITH HIGHEST MASS CHANGE
NODE MASS MASSO DM/MASSO
55525955 0.8407E-02 0.6118E-03 0.1345E+07 (4)
55526229 0.1553E-02 0.1191E-03 0.9231E+06

```

図 391:

たとえば、以下のケースでは、シミュレーションがエラー終了で失敗する前に、次のメッセージが _0001.out に出力されることがあります:

```

CYCLE      TIME      TIME-STEP  ELEMENT      ERROR  I-ENERGY  K-ENERGY T
K-ENERGY R  EXT-WORK  MAS.ERR
62100     18.53      0.2985E-03  SOLID        230440718  -1.3%    0.3484E+05
0.1313E+06  109.7    1523.
RUPTURE OF SOLID ELEMENT NUMBER 230025298
DELETE CONNECTION SOLID ELEMENT 110010956, ENERGY= 4.732011155E-05
RUPTURE OF SOLID ELEMENT NUMBER 230024559
**WARNING MINIMUM TIME STEP 0.5976E-05 IN INTERFACE NB 2300040 (DTMIN=
0.1000E-04)
SECONDARY NODES NB          230373002  230373019
MAIN NODES NB              230373003  230373004
DELETE SECONDARY LINE FROM INTERFACE

```

初期交差によって大きいひずみが発生し、最終的にエラー終了となります。

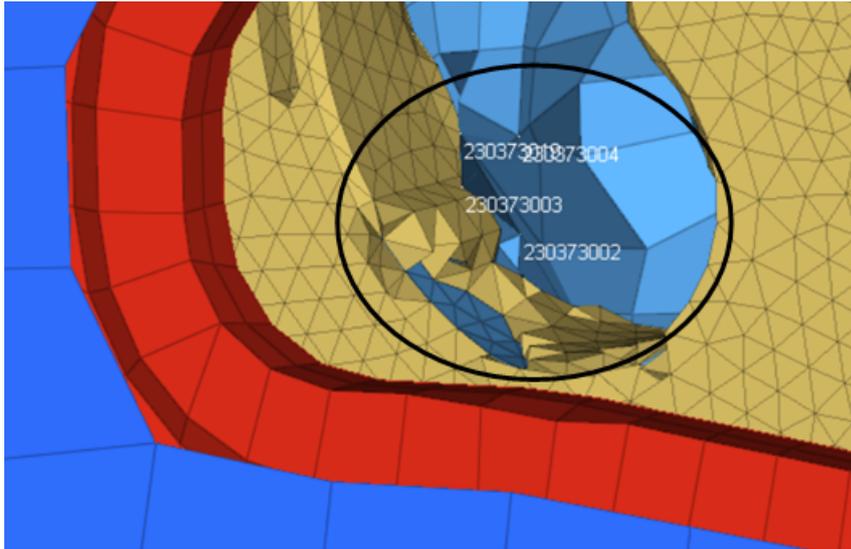


図 392:

たとえば、以下のケースでは、剛体との接触が原因で、実行が強制終了され、ERROR終了となります。出力ファイルは以下のようになります：

```

339840 67.61 0.5696E-09 INTER 2157 99.9% 0.1571E+06 0.6329E+13 0.1612E+09 -1661.
WARNING INTERFACE NB 2157
GAP= 0.6300000000000000 PENE= 0.6299999999957717
LINE 1237096 1237097 DE-ACTIVATED FROMINTERFACE

MESSAGE ID : 207

** RUN KILLED : TOTAL MASS ERROR LIMIT REACHED
  
```

図 393:

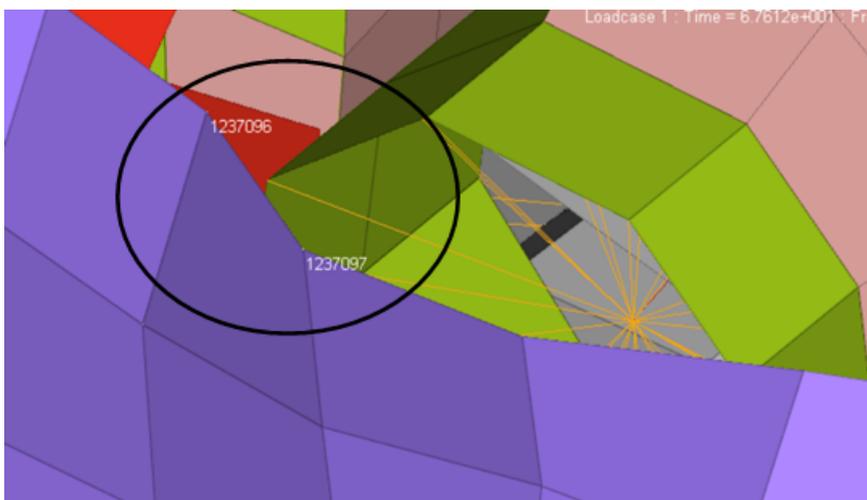


図 394:

負の体積のメッセージ

これは、主にソリッドメッシュの大きな変形により生じます。完全積分のソリッド要素では特にこの問題に関係し、これは悪いインターフェースの挙動や正確ではない材料定義により引き起こされることがあります。どのような場合でも、問題のあるせん断変形応答を避けるため共回転定式化の利用が推奨されます。

負の体積を避けるために、/DT/BRICK/CSTで応力-ひずみ計算オプション(/PROP)の仮定を用いることも可能です(このオプションの詳細については、[時間ステップ](#)と[有限要素](#)を参照してください)。

Appendix

基本的な関係式

	E, ν	E, G	E, B	G, ν	G, B	B, ν	λ, μ
E	E	E	E	$2(1+\nu)G$	$\frac{9BG}{3B+G}$	$3(1-2\nu)B$	$\frac{(3\lambda+2\mu)\mu}{\lambda+\mu}$
$G = \mu$	$\frac{E}{2(1+\nu)}$	G	$\frac{3EB}{9B-E}$	G	G	$\frac{3(1-2\nu)B}{2(1+\nu)}$	μ
$B = K$	$\frac{E}{3(1-2\nu)}$	$\frac{EG}{9G-3E}$	B	$\frac{2(1+\nu)G}{3(1-2\nu)}$	B	B	$\frac{3\lambda+2\mu}{3}$
ν	ν	$\frac{E-2G}{2G}$	$\frac{3B-E}{6B}$	ν	$\frac{3B-2G}{6B+2G}$	ν	$\frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)}$
D_{11}	$\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$	$\frac{(4G-E)G}{3G-E}$	$\frac{3B(3B+E)}{9B-E}$	$\frac{2G(1-\nu)}{1-2\nu}$	$\frac{3B+4G}{3}$	$\frac{3B(1-\nu)}{1+\nu}$	$\lambda+2\mu$
$D_{12} = \lambda$	$\frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$	$\frac{(E-2G)G}{3G-E}$	$\frac{3B(3B-E)}{9B-E}$	$\frac{2G\nu}{1-2\nu}$	$\frac{3B-2G}{3}$	$\frac{3B\nu}{1+\nu}$	λ
C_{11}	$\frac{E}{1+\nu^2}$	$\frac{4GG}{4G-E}$	$\frac{36BE}{36-(3-E/B)}$	$\frac{2G}{1-\nu}$	$\frac{4G(3B+G)}{3B+4G}$	$\frac{3B(1-2\nu)}{1-\nu^2}$	
C_{12}	$\frac{E\nu}{1+\nu^2}$	$\frac{(E-2G)2G}{4G-E}$	$\frac{6E(3-E/B)}{36-(3-E/B)}$	$\frac{2G\nu}{1-\nu}$	$\frac{2G(3B-2G)}{3B+4G}$	$\frac{3B(1-2\nu)}{1-\nu^2}$	

Hook則3D(主応力とひずみ)

$$\sigma = D\varepsilon$$

$$\sigma_1 = D_{11}\varepsilon_1 + D_{12}\varepsilon_2 + D_{13}\varepsilon_3$$

$$\sigma_1 = (\lambda + 2\mu)\varepsilon_1 + \lambda(\varepsilon_2 + \varepsilon_3)$$

$$\sigma_1 = \lambda(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) + 2\mu\varepsilon_1$$

$$\sigma_1 = K\varepsilon_{kk} + 2\mu\varepsilon_1 \quad \text{ここで、}\varepsilon_{kk} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad \text{および} \quad e_1 = \varepsilon_1 - 1/3(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)$$

Hook則2D(平面応力)

$$\sigma = C\varepsilon$$

$$\sigma_1 = C_{11}\varepsilon_1 + C_{12}\varepsilon_2$$

単位系

長さ	時間	質量	力	圧力	速度	ρ	エネルギー	G
m	s	Kg	Kg m/s ²	N/m ²	m/s	Kg/m ³	Kmg ² /s ²	9.81
m	s	Kg	N	Pa	m/s	m Kg/l	J	9.81
m	s	g	mN	mPa	m/s	μ Kg/l	mJ	9.81
m	s	Mg (ton)	KN	KPa	m/s	Kg/l	KJ	9.81
m	ms	Kg	MN	MPa	Km/s	m Kg/l	MJ	9.81e-6
m	ms	g	KN	KPa	Km/s	μ Kg/l	KJ	9.81e-6
m	ms	Mg (ton)	GN	GPa	Km/s	Kg/l	GJ	9.81e-6
mm	s	Kg	mN	KPa	mm/s	M Kg/l	mJ	9.81e+3
mm	s	g	mN	Pa	mm/s	K Kg/l	nJ	9.81e+3
mm	s	Mg (ton)	N	MPa	mm/s	G Kg/l	mJ	9.81e+3
mm	ms	Kg	KN	GPa	m/s	M Kg/l	J	9.81e-3
mm	ms	g	N	MPa	m/s	K Kg/l	mJ	9.81e-3
mm	ms	Mg (ton)	MN	TPa	m/s	G Kg/l	KJ	9.81e-3
cm	ms	g	daN	10 ⁵ Pa bar	dam/s	Kg/l	dJ	9.81e-4
cm	ms	Kg	10 ⁴ N (KdaN)	10 ⁸ Pa (Kbar)	dam/s	K Kg/l	hJ	9.81e-4
cm	ms	Mg (ton)	10 ⁷ N (MdaN)	10 ¹¹ Pa (Mbar)	dam/s	M Kg/l	10 ⁵ J	9.81e-10
cm	μ_s	g	10 ⁷ N	10 ¹¹ Pa	10 ⁴ m/s	Kg/l	10 ⁵ J	9.81e-10

長さ	時間	質量	力	圧力	速度	ρ	エネルギー	G
			(MdaN)	(Mbar)				

フィルタリング

多くの場合、数値的なノイズを除去するために、材料則や破壊基準の結果をフィルタリングすることが有用です。最も一般的なフィルターは、指数移動平均フィルターです。これは、ひずみ速度効果を含む材料モデルでは特に重要です。

ほとんどの材料では、 $F_{cut}CUT$ を用いて入力されたカットオフ周波数とフィルタリングを有効にするためにフラグ $F_{smooth}smooth = 1$ を定義する必要があります。ひずみ速度をフィルタリングする場合は、以下を使用します：

$$\dot{\epsilon}_{filtered}(t) = \alpha \dot{\epsilon}(t) + (1 - \alpha) \dot{\epsilon}_{filtered}(t - dt) \quad (287)$$

ここで、

$\dot{\epsilon}_{filtered}(t)$

フィルタリングされたひずみ速度

$\dot{\epsilon}(t)$

フィルタリング前の現在の時間ステップでのひずみ速度。

α

重み減少の程度。0～1の間の一定のスミージング係数です。値が大きいほど、急速に前の値から低減し、フィルタリングが少なくなります。

dt

シミュレーションの時間ステップ。

$\dot{\epsilon}_{filtered}(t - dt)$

前の時間ステップでフィルタリングされたひずみ速度。

$F_{cut}CUT$ を入力できる材料則の場合。

$$\alpha = 2\pi \ dt \ F_{cut} \quad (288)$$

ここで、 $F_{cut}CUT$ はカットオフ周波数。

したがって、

$$F_{cut} = \frac{\alpha}{2\pi \ dt} \quad (289)$$

カットオフ周波数は、モデルの時間ステップの関数です。経験上、変形の数も重要であることがわかります。自動車の衝突のように低速である場合、1 - 10 kHz (1000 - 10,000 Hz) が良好な値ですが、弾道のような高速イベントでは、より少ないフィルタリングを使用すべきであり、したがって、1 - 10 GHz が適切です。各シミュレーションの妥当な値を決定するためには、優れた工学的判断が必要です。ひずみ速度のフィルタリングの例については、[RD-E: 1102 ひずみ速度効果](#)をご参照ください。

陰解法構造有限要素解析

Radiossでは、陰解法および陽解法時間積分スキームが利用可能です。陽解法スキームでは、速度と変位は節点加速度の直接積分により得られます。このアプローチでは、安定性の考慮が必要なため、サイクルの時間ステップが小さくなる場合があります。そのため、検討の時間が長い静的問題やゆっくりとした動的問題の計算では、シミュレーションの実行に多くのサイクルを必要とします。このような場合、陽解法の代替として陰解法時間積分スキームがあります。陰解法スキームでは無条件安定で、結果として陽解法に対して大きな時間ステップとなることが示せます。しかしながら、陰解法スキームでは、全体剛性マトリックスを作成して逆行列をとる必要があり、1荷重ステップ当たり、より高い計算コストとより多くのメモリを必要とすることになります。

陽解法アプローチは、高い幾何学的非線形と材料非線形挙動のある速い動的問題に対してより魅力的です。全ての量はベクトルとして取り扱われ、より小さな記憶容量しか必要としません。シミュレーションを完了するためのサイクル数は非常に大きくなりますが、全体として効率的になることができます。陰解法では、これに対し、静的問題への適用や長時間のシミュレーションに対してより効率的です。

オプションの解法は陰解法と陽解法の両方を持つことで、同じコードで既に利用可能です。加えて、Radiossの陰解法と陽解法ソルバーは、内力の計算に同じルーチンを共有し、これが2つのスキームの間を移行する際の不つり合い問題の発生を抑制してシームレスな切り替えを可能にしています。これにより、2つのスキームは組み合わせて多段階解析を実行することが可能となります。陰解法解析に使用される2つは、金属板成形(陽解法)の後のスプリングバック(陰解法)、または衝突解析(陽解法)の前の重力荷重 / 初期状態の計算(陰解法)です。その他のすべての陰解法シミュレーションには、OptiStructの使用が推奨されます。

陰解法は無条件安定のスキームですが、無条件に収束するわけではありません(非線形の場合)。実際、一般的に陽解法スキームよりもロバスト性は低く、解析にはユーザーのより多くの関与を必要とします。

このセクションでは、種々の陰解法解析に対して可能な陰解法の機能を最初に示し、続いて陰解法シミュレーション機能をアクティブ化するためのキーワードのリストを示します。また、より深い理解と、さまざまな陰解法オプションを効率的に用いるための詳細情報を紹介しています。最後に、[出力メッセージ](#)および[トラブルシューティングテクニック](#)の一部を記載します。

陰解法の機能と互換性

陽解法の全ての機能が陰解法解析で可能なわけではなく、実際に利用可能な機能についてこのセクションで示します。

要素定式化

Radioss陰解法では、要素定式化は2つのメインの計算で使用されます。

1. 変位を決定する剛性マトリックス:

この計算に使用可能な要素定式化を以下の表に示します。

2. ひずみ、応力、および内部節点力:

陰解法解析と陽解法解析は同じコーディングを共有し、すべての定式化がこの計算に使用可能です。

/BRICK	/TETRA4	/TETRA10	/BRIC20	厚肉シェル /BRICK、/ PENTA6
$I_{solid}SOLID=24$ $I_{solid}SOLID=14$ (推奨)	$I_{tetra4}=0$	$I_{tetra10}=0$	$I_{solid}SOLID=16$	$I_{solid}SOLID=14、15$

/SHELL	/SH3N	/SPRING	/BEAM	/TRUSS
$I_{shell}SHELL=24$ (QEPH) $I_{shell}SHELL=12$ (QB)	$I_{sh3n}SH3N=1$ $I_{sh3n}SH3N=2$ (デフォルト)	/PROP/TYPE4、/ PROP/TYPE8、/ PROP/TYPE12、/ PROP/TYPE13	/PROP/TYPE3 (BEAM)	/PROP/TYPE2 (TRUSS)

モニター体積TYPE3、直交異方性シェル(TYPE9、10、11および17)も利用できます。

バージョン11からは、直交異方性ソリッド(TYPE6)も利用できます。ただし、特に非線形解析では、上記の表の要素を強く推奨します。

材料の適合性

Radiossは、ほとんどの材料則に対して、剛性マトリックス(または非線形解析でのヤコビアンマトリックス)の生成に材料定数の弾性部分のみを用います。

超弾性材料則(42、62、69、82)に対しては、発散を避けるため、特別な取り扱いがなされています。弾性マトリックスの使用(初期応力法と呼ばれます)は結果として収束が遅くなります(一貫した接線剛性マトリックスは開発中です)。この場合、非線形解法である修正ニュートン法と準ニュートン(BFGS)法の2つが推奨されます。粘性型の材料則が準-静的解析に用いられる場合、シミュレーションに対して長い継続時間が推奨されます(この場合、時間の物理的意味がなくなります)。このようにして、どのRadioss材料則に対しても非適合は無くなりますが、非線形性の高い材料に対しては収束性の問題は残るかもしれません。

運動条件

いくつかの運動条件がサポートされています。

以下の利用可能な運動学的条件がRadioss陰解法でもサポートされています：

- 境界条件：/BCS
- 強制変位/IMPDISP(速度/IMPVEL、および加速度/IMPACC)
- 剛体/RBODY
- インターフェースTYPE2 /INTER/TYPE2(破断またはペナルティ法は利用不可)
- 剛壁/RWALL(パフォーマンスの観点から推奨できません。可能であれば接触インターフェースを使用してください。)
- アダプティブメッシュリンク/ADMESH
- 補間拘束要素/RBE3
- 剛体要素/RBE2

接触インターフェース

接触インターフェース 5、7、10 と1 のみが利用可能で、Radioss陰解法でサポートされてます。

 注： インターフェースタイプ7の一部のオプション、 $I_{fric}FRIC > 0$ 、 $I_{adm}ADM$ 等は現在利用できません。SMPバージョンでのみ、陰解法のタイプ24接触を使用して利用可能です。

接触インターフェースはペナルティ法（架空のスプリングを伴う）を通して取り扱われ、接触剛性は独立な剛性マトリックスに保存されます。この2番目の剛性マトリックスに関する情報は(/IMPL/PRINT/NONLIN/nが定義された場合)接触が検知されたときに一度出力されます。

荷重

集中荷重 /CLOAD、圧力 /PLOAD、および重力荷重 /GRAVが利用可能です。荷重定義は陽解法の場合と同じです。

 注： 非線形陰解法解析で時間に基づく荷重関数は反復の収束性に影響することには更なる注意が必要です。このような計算では、重力荷重や強制変位が与えられる場合でも、一定の関数の代わりに時間とともに増加する関数を用いることを推奨します。

熱解析

Radiossでは、全ての熱オプションは現時点で陰解法解析では利用できません。

陰解法解析タイプ

次の解析モジュール(タイプ)が可能：

- /IMPL/CHECKでのモデルチェック
- 静的または準-静的線形
- 座屈モード解析
- 静的又は準-静的非線形
- 動的非線形

- モード解析

陰解法解析のアクティブ化

Radioss陰解法解析の起動のために必要なキーワードはEngineファイルで定義され、/IMPLで始まります。

唯一の例外は、モード解析実行のための/EIGで、Radioss Starterで定義されます。ほとんどのRadioss出力項目は陰解法と陽解法の解析で同じ意味を持ちます。

静的問題では、時間ステップが用いられます。これは物理的な意味は持たず、荷重と変位の増分を定義するためだけに使われます。即ち、ここでのサイクル番号が増分番号に対応します。

そのため、Engine入力ファイルの変更は最小限となっています。たとえば、/PRINT(例: /PRINT/-1はそれぞれの増分ごとに出力)と他の出力ファイルの出力頻度などの出力に、大きな時間ステップが用いられたものとして評価します。

 注: 以下のセクションでアスタリスク (*) の印が付いたものは必要な項目です。

線形解析

線形解析で基本的なキーワードは:

1. 線形静解析:

* /IMPL/LINEAR: 線形系解析の計算

/IMPL/SOLVER/n: 線形ソルバーの手法、ここでnはソルバーのタイプ

/IMPL/PRINT/LINEAR/Nprint: 線形反復の出力頻度

出力間隔のキーワードは主として反復ソルバー(または混合法)のために用いられます。直接法ソルバーと共に用いられた場合、相対残差が出力されます。

/IMPL/LINEAR/INTER: 単純な2ステップ線形アプローチを通して、線形解析で接触を考慮することもできます。最初の線形ステップで貫通を評価し、続く線形の第2のステップでインターフェース反カスプリングを生成します。

2. 線形準-静的解析:

* /IMPL/QSTAT: 準-静的解析

/IMPL/QSTAT/DTSCAL: 内部剛性を付加するスケールファクター

/IMPL/QSTAT/DTSCALが /IMPL/LINEAR/INTERと共に用いられた場合、スケールリングファクターは第2ステップにのみ作用されます。

3. Euler座屈:

* /IMPL/BUCKL: Euler座屈モード

* /IMPL/LINEAR: 線形系解析の計算

/IMPL/BUCKL/1になり、Lanczosソルバー(BCSLIB-EXT)が座屈モード抽出に使用されます。リスタートからの座屈や、プリストレス状態での座屈も(キーワード /IMPL/BUCKL/2で)可能です。

アニメーション出力ファイル(*Annn)は、座屈解析の場合は特別です。それぞれのファイルは1つの座屈モードを含みます(ここで限界荷重が時間の値として表示されます)。座屈解析の前に線形計算が行われた場合、最初の2つのアニメーションファイル(*A001、*A002)は線形構造計算の結果を含み、座屈モードは3番目のアニメーションファイル(*A003)から始まります。

非線形解析

陰解法の非線形解析では反復計算が必要になります。通常、シミュレーションは非線形性を取り扱うためにいくつかの増分(ステップ)に分割され、これらは時間ステップコントロールで表現されます。

非線形ソルバー(Newton法に基づいた手法)がそれぞれのステップで更新された形状(大変位、大ひずみ)でのつり合い力を見つけるのに用いられます。

2タイプの制御パラメータを用いる必要があります。

- 非線形ソルバー(/IMPL/NONLIN/nを用いて)
- ステップ(/IMPL/DT/n、/IMPL/DTINI、および/IMPL/DT/STOPを用いて)

非線形解析の基本的なキーワード:

* /IMPL/NONLIN/n: 非線形ソルバーの手法、ここでnは非線形ソルバーのタイプ

/IMPL/SOLVER/n: 線形ソルバーの手法、ここでnは線形ソルバーのタイプ

/IMPL/PRINT/NONLIN/Nprint: 非線形反復の出力間隔

* /IMPL/DT/n: 時間ステップコントロール、ここでnは時間ステップコントロールの手法

* /IMPL/DTINI: 初期時間ステップ

/IMPL/DT/STOP: 最小-最大時間ステップの値

/IMPL/QSTAT: 準-静的陰解法解析

/IMPL/SPRBACK: スプリングバック計算

陰解法ソルバー

並列バージョンとの陰解法ソルバーの適合性の表

	オプション	Radioss SMP	Radioss MPP SPMD
陰解法	<code>/IMPL/SOLVER</code>	PCG	
	<code>/IMPL/SOLVER/3</code>	BCS	MUMPS
	<code>/IMPL/SOLVER/5</code>	BCS+PCG	MUMPS+PCG
座屈モード	<code>/IMPL/BUCKL/1</code> ここで、 <i>Isolv</i> =1	SuperLU	MUMPS
固有モード	<code>/EIG (Starter)</code>	SuperLU	MUMPS

頭字語:

PCG:	Iterative Preconditioned Conjugate Gradient(反復的な前処理付き共役勾配法)
BCS:	Boeing Solver(Boeingソルバー)
MUMPS:	Massively Parallel Multi-Frontal Solver(超並列マルチフロント法ソルバー)

線形ソルバー:

直接、反復と混合法

線形ソルバーは線形、非線形の両方に用いられ、実際に行う計算事象に対して適切なソルバーを選択することは非常に重要です。

PCG(前処理付共役勾配法)反復ソルバーは、Radioss陰解法(初期バージョンからサポート)で利用可能です。直接法ソルバーが利用可能です。因子化された近似逆行列による前処理法を用いたPCGがデフォルトのソルバーです。

適切なソルバーの選択は適用するモデルに依存します。一般的に、反復ソルバーは均一の剛性を持つ条件の良いモデル(ソリッド要素モデルなど)に適しています。一方、剛性が不均一な条件の悪いモデルについては計算負荷が高くなります。これに対して、直接ソルバーはより高精度な解を得られ、マトリックスの質にもあまり敏感ではありませんが、より多くのメモリ量を必要とします。アウトオブコアメモリが用いられた場合、直接法のパフォーマンスは大きく下がる可能性があります。

ある特定の解析対象に対してどのソルバーを用いるべきかはっきりしない場合は、メモリーが問題ない場合には直接法を最初に試すことが推奨されます。フルビークル解析の様な大規模シミュレーションでは、メモリー量が問題となる可能性があるため、高品質の前処理(これは`/IMPL/PREPAT/n`、例えば $n=2$)を用いたPCGソルバーを代わりに用いることも可能かもしれません。

非線形解析において、実際の解析を起動する前に単純な線形解析を実行し、同じモデルに2つの方法を試して比較することは価値のあることです。

混合ソルバーは接触剛性の自由度数が全自由度よりもはるかに少ない接触のシミュレーションに対して良いパフォーマンスを示すかも知れません。

非線形ソルバー

修正Newtonと準-Newton法

この点に関しても、ソルバーの選択は解析のタイプに依存します。一般的に、高い非線形を持つ解析には準-Newton法がより適していますが、より多くのメモリを必要とし、反復当たりの計算コストも高くなります。

RadiossとAcuSolveを用いた流体-構造相互作用解析

注：流体-構造直接連成相互作用 (DC-FSI) RadiossおよびAcuSolveのサポートは中止されています。現時点では、OptiStructユーザーズガイドの流体-構造相互作用で説明されているとおり、OptiStructをAcuSolveと組み合わせて用いることが推奨されます。

RadiossとAcuSolveは完全に統合され、直接流体-構造連成相互作用 (DC-FSI) 解析を、分割されたスタagger (partitioned staggered) アプローチで実行することができます。RadiossとAcuSolveは、共に時間領域のシミュレーションコードであり、連成解析を複数の時間ステップに分割します。RadiossとAcuSolveの両方の支配方程式は非線形で、それぞれの時間ステップでサブ反復を必要とします。FSI解析のそれぞれのサブ反復で、AcuSolveでの流体反力は節点力に変換されRadiossの構造インターフェースメッシュに伝達されます。これらの力はRadiossを用いた構造の変形の計算に用いられます。流体流れの反力からの荷重に加えて、付加的な構造の荷重も作用される点には注意が必要です。結果の構造の変形形状は新しい流体境界としてAcuSolveに戻されます。このFSIサイクルを下の図 395に示します。

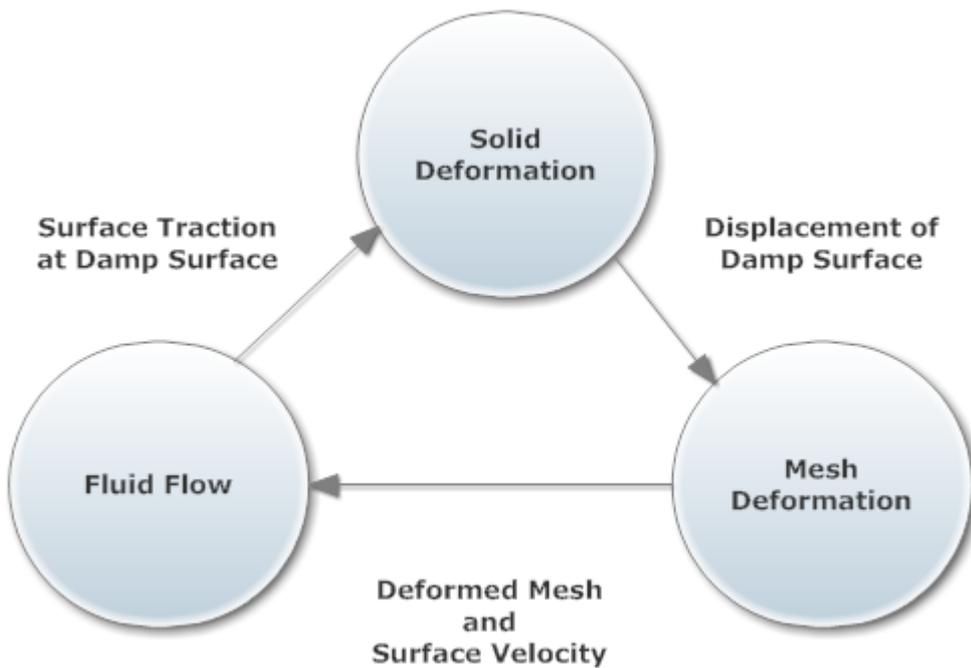


図 395: 直接流体-構造連成相互作用 (DC-FSI) サイクル

適用分野

DC-FSIの能力は複雑な構造の応答に対応した流体流れへの複雑な相互関係のシミュレーションを目的としています。この能力は特に非線形構造応答を表す問題に適しています。これは線形の構造応答に対しても用いることができます。しかし、線形構造応答に対しては、P-FSI解法がAcuSolveにより提供されており、線形化された構造応答を非線形流れの解法でより効率的に解くことができます。P-FSI法のより詳しい情報に関しては、AcuSolveコマンドリファレンスマニュアルを参照してください。非線形材料、非線形幾何学的効果、接触を含むRadioss機能の大部分を用いることができます。インターフェース領域はソリッド、シェル、ビーム要素でモデル化できます。AcuSolveのほとんどの機能はDC-FSIシミュレーションに用いることができます。これらの機能はいわゆる層流または乱流流れ、熱伝導、材料オプションの多くのセット、自由表面やマルチ-スピーシーズがもたらす流れを含みます。移動境界問題はArbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) とスライディングメッシュテクノロジーを用いてモデル化されます。詳細については、AcuSolveCommand Reference Manualをご覧ください。

この能力のターゲットとなる主な適用分野は以下を含みます：

- 自動車: 流体減衰ラバーマウント、ドアシール、ショックアブソーバー、ラバーダイアフラムとアンチショックブレーキシステムの値の設計
- 石油 / ガス: 長い海洋ライザー、係船、自由なスパンとドリリングライザー
- 航空宇宙: 翼の空弾性、UAVとMAV
- 風力タービン: ブレードの大きな変形
- 消費財: デザインとパッケージング
- バイオメディカル

See Also

[Fluid-Structure Interaction](#)

RadiossとAcuSolveを用いたDC-FSI

DC-FSI問題を解くには、以下のワークフローを強く推奨します:

1. Radioss構造モデルとAcuSolveのみの流体モデルを作成し、非連成解析が成功裏に実行できることを確認します。
2. DC-FSIコマンドを含むスタンドアロンモデルを準備します。
3. 解析を実行します。
4. FSIの解のポストプロセスを行います。

このワークフローでは、RadiossとAcuSolveモデルの両方が正しく定義されていることを連成シミュレーション実行前に確認しています。RadiossとAcuSolveでは特定の単位系で解析実行を行う必要はありませんが、両方とも一貫した単位系を用いる必要があります。規則として、2つのソルバーの間で交換される全ての量は単位を持つ形式で、全てのベクトル量の成分はその内部フレームで解かれます。一貫性のため、RadiossとAcuSolveで同じ内部フレームが選択される必要があります。

Radiossモデル

DC-FSIを含むRadiossモデルを以下の3ステップで準備します:

1. Radiossの入力デッキを作成
2. インターフェース領域と交換される解の量を指定
3. 通信スキームを定義

Radioss FSI 入力データのEngineキーワード/IMPL/DYNA/FSIを以下に示します:

```
/IMPL/DYNA/FSI
ESET SSET PORT MINX MAXX TAG DATA MSG WAIT INIT
FTOL DTOL TTOL XTOL
```

各データ項目について以下に示します。

減衰サーフェス

構造メッシュの減衰サーフェスは、Radioss FSI入力データで指定される必要があります。減衰サーフェスは要素グループかサーフェスのどちらかで指定できます。減衰サーフェス上の構造メッシュはインターフェースの流体メッシュと一致する必要はありません。AcuSolveは、流体インターフェースメッシュ上のCFD反力を内部的に一致しない構造メッシュの減衰サーフェスに投影します。節点力のマッピングは構造のビーム要素に対してもサポートされています。例えば、ロッド、パイプまたはブレードが構造メッシュ内の単純化されたビーム要素でモデル化できます。対応する流体メッシュではこれらのビーム要素の実際の3次元形状を含むことができます。

減衰サーフェスが要素グループ (ESET) で指定される場合、/GRBEAM/BEAM/、/GRSHEL/SHEL/、/GRSH3N/SH3N/をそれぞれ、ビーム、4節点シェル、3節点シェル要素に対して用います。ソリッドの減衰サーフェスはシェル要素で覆い、これらの要素に/MAT/LAW0データを用いたゼロ材料プロパティを割り当てることで指定できます。減衰サーフェスがビーム要素からなる場合、これらはビーム要素グループデータで指定される必要があります。要素グループのIDは、/IMPL/DYNA/FSIデータの最初の項目です。

減衰サーフェス (SSET) は、Radioss /SURFデータにより指定することもできます。/SURFには、サーフェス指定に用いられる多くのオプションがあります。このサーフェスはシェル構造のサーフェスかソリッドメッシュのサーフェスのどちらかです。サーフェス IDは、/IMPL/DYNA/FSIデータの2番目の項目です。/SURFデータを使用してビーム要素を指定することはできません。

 **注:** 減衰サーフェスは要素グループとサーフェスの組み合わせで定義できます。

一致する流体サーフェスはAcuSolveデータ内でEXTERNAL_CODE_SURFACEコマンドを用いて定義されます。

あるケースでは、構造の減衰サーフェスの一部は、AcuSolveがAcuSolve境界面として関連付けられるように"タグ"をつける必要があります。これは、EXTERNAL_CODE_SURFACEデータ内のexternal_code_tagsパラメータでRadiossパート IDを指定して行います。

例:

```
EXTERNAL_CODE_SURFACE( "Drill" ) {
    ...
    external_code_tags = {"10"}
    ...
}
```

データはこのサーフェスがRadiossパートID10に対応することを指定するために用いられます。各サーフェスは同じパートIDを持つ要素で構成される必要があります。また個々のサーフェスはそれぞれ異なるパートIDを持つ要素で構成される必要があります。ソリッド構造のサーフェスであるタグを適用するには、ソリッドがシェル要素で覆われ、これらのシェル要素のプロパティIDがサーフェスタグとして使用されている必要があります。サーフェスタグの使用を指定する場合は、/IMPL/DYNA/FSI データの項目10を1に設定します。

AcuSolveモデル

このセクションではDC-FSI用のAcuSolveモデル準備のための概要を示します。コマンドの詳細については、*AcuSolve Command Reference Manual*をご参照ください。AcuSolveモデル準備のための3ステップ:

1. 外部フィールドを含める解析パラメータを設定します。
2. 解法のストラテジーを定義します。
3. 外部サーフェスを定義します。

外部フィールドを含む解析パラメータの設定

EQUATIONコマンドを用いて、利用可能なソリューションフィールドを指定するか、問題に有る方程式の系を指定します。外部ソルバーで計算されるフィールドを含めるには、Radiossでは、external_code パラメータをONに設定します。

例えば、AcuSolveが流れを計算し、Radiossが変位を計算する流体 - 構造解析を行う時、external_codeパラメータをONにし、任意のメッシュ移動をmeshパラメータをarbitrary_lagrange_eulerianに設定することで可能にします。

```
EQUATION {
    flow = navier_stokes
    mesh = arbitrary_lagrange_eulerian
    external_code = on
}
```

解法のストラテジーの定義

この問題にソリューションフィールドが存在することを指定するEQUATIONと共に、TIME_SEQUENCEとSTAGGERコマンドを用いて時間ステップとスタグリングのストラテジーを定義する必要があります。よく用いられる方法はAUTO_SOLUTION_STRATEGYコマンドを用いて Acusolveが解法のストラテジーコマンドを生成する方法です。解法のストラテジーコマンドをハイライトさせるためには、TIME_SEQUENCEとSTAGGERコマンドをハイライトさせます。

TIME_SEQUENCEコマンドは時間ステップとスタグリングのストラテジーを指定します。以下の例では、外部フィールドが構造の変位によって最初に解かれ、次に流体要素が調整されてメッシュの変位(ALE)が続きます。次に流れと乱流方程式が解かれます。

```
TIME_SEQUENCE {
  min_time_steps           = 1
  max_time_steps           = 15
  :
  min_stagger_iterations   = 1
  max_stagger_iterations   = 20
  staggers                 = { "external_code",
"mesh_displacement",
"flow",
"turbulence" }
}
```

解かれるそれぞれのフィールドで(例えばそれぞれのスタグラーはTIME_SEQUENCEコマンドで定義されます)、非線形反復と線形ソルバーのパラメータをSTAGGERコマンドを用いて定義する必要があります。例えば、STAGGERコマンドはexternal_code、mesh_displacementとflow方程式に対して示されます。

```
STAGGER ( "external_code" ) {
  equation                 = external_code
  min_stagger_iterations   = 1
  max_stagger_iterations   = 10
}

STAGGER( "mesh_displacement" ) {
  equation                 = mesh_displacement
  min_stagger_iterations   = 1
  max_stagger_iterations   = 5
  convergence_tolerance    = 0.1
  linear_solver            = conjugate_gradient
  min_linear_solver_iterations = 10
  max_linear_solver_iterations = 1000
  linear_solver_tolerance  = 0.001
  projection               = off
}

STAGGER( "flow" ) {
  equation                 = flow
  min_stagger_iterations   = 1
  max_stagger_iterations   = 2
  convergence_tolerance    = 0.1
  lhs_update_frequency     = 1
  linear_solver            = gmres
  linear_solver_tolerance  = 0.1
}
```

流体-構造インターフェースの定義

EXTERNAL_CODE_SURFACEコマンドを用い、流体と構造の間のインターフェースを定義します。コマンドはサーフェスのトポロジーと共に、インターフェースのプロパティを指定します。

以下は、3節点の3角形から構成される、MESH.DIRディレクトリに置かれたwall.ebcからインターフェーストポロジーを読み込んだ例です。velocity_type、temperature_type、およびmesh_displacement_typeはインターフェースのプロパティ(境界条件)を定義します。以下にこの内容について示します。

```
EXTERNAL_CODE_SURFACE( "wall" ) {
  surfaces = Read( "MESH.DIR/wall.ebc" )
  shape    = "three_node_triangle"
  element_set = "tet fluid"
  velocity_type = wall
  temperature_type = tied
}
```

```

mesh_displacement_type = tied
gap = 0
gap_factor = 0
external_code_tags = {}
}

```

インターフェースのプロパティまたは境界条件は、`mesh_displacement_type`、`velocity_type`および`temperature_type`パラメータを介して指定されます。`mesh_displacement`パラメータは流体メッシュが固体メッシュに固定されているか、固体メッシュサーフェスに対して滑りを考慮できるかを定義します。`mesh_displacement_type=tied`の設定で流体メッシュは固定メッシュに固定され、または`mesh_displacement_type=slip`で流体メッシュは固定サーフェスに対して滑りが可能になり、ガイドサーフェスとして作用します。

`velocity_type`は構造メッシュ速度との関係で流体速度がどのように振舞うかを指定します。`velocity_type=wall`の設定で流体速度はメッシュ速度となり、`velocity_type=slip`の設定で流体速度の法線成分がソリッドメッシュ速度に対して固定されます。

`mesh_displacement`と`velocity_type`パラメータ設定に基づいて4つのインターフェースの組み合わせが可能です。これらを表 23にまとめます。

表 23: 直接流体-構造連成相互作用境界条件

流体 - ソリッドインターフェースの条件		メッシュの変位	
		タイド	滑り
速度タイプ	壁	$x_{fluid} = x_{solid}$ $u_{fluid} = \left(x_{fluid}^{n+1} - x_{fluid}^n \right) / \Delta t$	$x_{fluid} \in S_{solid}$ $u_{fluid} \cdot n = \left(x_{fluid}^{n+1} - x_{fluid}^n \right) / \Delta t \cdot n$ $u_{fluid} \cdot t_i = \left(x_{solid}^{n+1} - x_{solid}^n \right) / \Delta t \cdot t_i \quad i = 1, 2$
	滑り	$x_{fluid} = x_{solid}$ $u_{fluid} \cdot n = \left(x_{fluid}^{n+1} - x_{fluid}^n \right) / \Delta t \cdot n$	$x_{fluid} \in S_{solid}$ $u_{fluid} \cdot n = \left(x_{fluid}^{n+1} - x_{fluid}^n \right) / \Delta t \cdot n$

固体メッシュに沿った流体の滑りが考慮できる場合、流体と固体のメッシュの間の隣接の検索が連続的に実行されます。`gap_factor`パラメータで次元の無い(要素面の長さに関する)最大許容ギャップパラメータを指定し、指定された寸法の最大ギャップの距離でAcuSolveサーフェスのそれぞれの積分点と最も近いRadiossで与えられたサーフェスのギャップをチェックします。距離がギャップよりも大きい場合、計算はエラーメッセージを出して停止します。

RadiossとAcuSolveとの通信

RadiossとAcuSolveは、同じネットワークドメインにある、異種プラットフォームやリモートプラットフォーム上で実行できます。RadiossとAcuSolveとの通信は、ソケットを介して行われます。RadiossとAcuSolveの間の共同シミュレーションを行うためには、解析ソフトウェアの1つが通信プロセスを初期化する必要があります、もう1つのソフトウェアは初期化された通信プロセスに接続する必要があります。

Radiossでは、ソケットポート番号(PORT)は、/IMPL/DYNA/FSIデータの3番目の項目で指定されます。デフォルトのポート番号は10000です。同じポート番号が、AcuSolve.inpファイルのEXTERNAL_CODEデータで指定される必要があります。Radiossが実行されるマシンがlinux_machという名前の場合、EXTERNAL_CODEは以下のようになります：

```
EXTERNAL_CODE {
communication = socket
socket_initiate = no
socket_host = "linux_mach"
socket_port = 10000
}
```

AcuSolveとRadiossは個別に開始されます。AcuSolveはRadiossがソケット接続を初期化するのを待ちます。AcuSolveが待つ時間は/IMPL/DYNA/FSIデータのWAITパラメータで決められます。デフォルトの値は3600秒です。

時間ステップのループが開始される前に、インターフェースに関する基本情報が2つのコード間で交換される必要があります。最初に、インターフェースストラテジーを制御するパラメータの数が、両方のコードに設定される必要があります。次に、インターフェースの物理パラメータを定義する必要があります。典型的な例では、AcuSolveとRadiossの両方が同じ時間ステップで開始します。しかし、(流れの発達を得るために)AcuSolveが最初に開始される必要がある場合、/IMPL/DYNA/FSIデータのINITデータで、連成解析を開始するAcuSolveの初期時間ステップを設定することができます。

時間ステップとデータ交換

RadiossとAcuSolveはどちらも同じ時間ステップサイズを使用する必要があり、時間ステップの合計数が同じである必要があります。また、時間ステップのサイズは、RadiossとAcuSolveの両方で一定のままである必要があります。例えば、0.001秒で1000時間ステップに対して、AcuSolveとRadiossのデータは：

```
AUTO_SOLUTION_STRATEGY {
initial_time_increment = 0.001
max_time_steps = 1000
min_stagger_iterations = 1
max_stagger_iterations = 20
}
```

および

```
/RUN/wing/1
1.0
/IMPL/DTINI
0.001
/IMPL/DT/2
12 0.0 120 1.0 1.0
```

Radioss入力データで/IMPL/DT/2の項目4および5が時間ステップの係数を指定します。Radiossの時間ステップが一定を保つように1.0が設定される必要があります。

それぞれの時間ステップで、RadiossとAcuSolveの間で、ある収束判定基準に達するまで力と変位が交換されます。収束に至ると、解析は次のタイムステップで続行されます。これらの交換はAcuSolveで"スタグガー"と呼ばれます。スタグガー(交換)の最小数は両方の入力データで1に設定されるべきです。これは、AcuSolveではAUTO_SOLUTION_STRATEGYデータのmin_stagger_iterationsパラメータで指定され、Radioss/IMPL/DYNA/FSIデータではMINXデータで指定されます。

交換の最大数は力と変位の収束判定基準と最大交換数のハードリミットの組み合わせでコントロールされます。交換の最大数はAcuSolveではAUTO_SOLUTION_STRATEGYデータのmax_stagger_iterationsパラメータで設定され、Radiossでは/IMPL/DYNA/FSIデータのMAXXデータで設定されます。

力と変位の収束判定基準は安定で精度の良い結果を得るのに必要な交換の数を減らすために用いられます。これにより正確な結果を保証する実行時間を大きく減らすことが可能になります。力と変位の収束判定基準はRadiossの/IMPL/DYNA/FSIデータのFTOLとDTOLデータで指定されます。これらは力と変位ベクトルのL2ノルムの判定基準です。これらの判定基準を上げた場合、計算時間は減少しますが、解の精度が低下する可能性があります。

典型的な場合では、力と変位だけが交換される必要があります。特別なケースでは、ビームの回転のように、ユーザーがモーメントと回転についても交換を要求することができます。これは、Radioss/IMPL/DYNA/FSIデータのDATA/パラメータを2に設定することでできます。

データ交換の検証

RadiossとAcuSolveの間で正しいデータが交換されているかを検証するために、Radiossの/IMPL/DYNA/FSIデータでMSGパラメーターを非ゼロの値に設定することができます。より大きな値で、より多くの量の情報がRadioss .outファイルに検証のため書かれます。このデータは通信制御パラメータだけでなく交換される力とモーメントの実際の値も含まれません。

例

典型的な場合では、RadiossとAcuSolveで流体 - 構造相互作用解析を実行するのに減衰サーフェスの定義のみ必要です。減衰サーフェスのIDが10の場合、入力データは次のようになります：

```
/IMPL/DYNA/FSI
0 10 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0
```

このケースでは、他のFSIパラメータ全てはデフォルト値に設定されます。Radiossでは0はデフォルト値を意味し、(デフォルト値が実際0でない限り)明確に0を与えていない点に注意してください。

計算時間を減少させるために、交換の数の上限を設定すると共に、力と変位の収束判定基準により高い値を設定することもできます。例えば、FSIで交換の最大数に5を設定し、力と変位の収束判定基準に0.01と0.005をそれぞれ設定することもできます：

```
/IMPL/DYNA/FSI
0 10 0 0 5 0 0 0 0 0
0.01 0.005 0 0
```

ビーム要素にタグが付いた問題で、モーメントと回転の交換をするケースでは、その入力データは以下のようになります：

```
/IMPL/DYNA/FSI
20 0 0 0 0 1 1 0 0 0\
0 0 0 0
```

ここで、20は全てのビーム要素を含む要素セットです。ビーム要素タグはそのビームプロパティIDに基づきます。

Radiossの構造FSIデータ

構造解析のタイプは陰解法銅解析で一般化Newmark法を用いて解かれます。したがって、Radioss Engineキーワードは：

```
/IMPL/DYNA/2
```

提案されるRadioss時間ステップでの収束判定基準は、エネルギーと力に対して0.001で変位は0.01で、陰解法コントロールデータで設定されます：

```
/IMPL/NONLIN/1
123 0.001 0.001 0.01
```

時間ステップは一定でなければならず、時間ステップコントロール法は時間ステップを変更せずに多くの反復を行うことができることから時間ステップの係数は1.0に設定する必要があります。時間ステップコントロール法2のデータは、以下のようになります：

```
/IMPL/DT/2
12 0.0 120 1.0 1.0
```

発散の許容反復回数も時間ステップが調整されないように増加される必要があります。これは発散の基準を5にすることで次のように設定できます：

```
/IMPL/DIVERG/5
```

最後に、流体から作用された力と結果の変位をRadioss結果のアニメーションファイルに書き出すため、以下を用います：

```
/ANIM/VECT/FEXT  
/ANIM/VECT/DISP
```

モデルの場所

RadiossモデルとAcuSolveモデルは、同じ場所に存在する必要があります。言葉を変えると、流体境界メッシュと対応する構造減衰サーフェスは相互に物理境界として一致している必要があります。これらのメッシュの間のギャップは、小さくしなければなりません。交換サーフェスの一致をAcuSolveで検証するため、.Logファイルの以下に示す構造メッシュ情報を確認してください。位置、サイズ、および方向の不一致の特定に役立つよう、減衰サーフェス要素の数および減衰サーフェスの最小座標と最大座標に加え、一致する境界ボックスと面積も確認します：

```
acuSolve: No. external code nodes = 15050  
acuSolve: No. external code tri3s = 0  
acuSolve: No. external code quad4s = 15000  
acuSolve: Min/Max x-coord = -3.812500e-02 3.812500e-02  
acuSolve: Min/Max y-coord = -3.805000e-02 3.805000e-02  
acuSolve: Min/Max z-coord = 0.000000e+00 3.812500e+00  
acuSolve: Total surface area = 9.126732e-01  
acuSolve: No. fluid damp surfaces = 5637  
acuSolve: Min/Max x-coord = -3.812499e-02 3.812500e-02  
acuSolve: Min/Max y-coord = -3.812494e-02 3.812498e-02  
acuSolve: Min/Max z-coord = 0.000000e+00 3.812500e+00  
acuSolve: Total fluid surface area = 9.128247e-01
```

それぞれの時間ステップで、流体の荷重により減衰サーフェスは変形します。同時に、流体メッシュは新しい減衰サーフェスに一致するように移動します。それぞれの時間ステップでの平均と最大ギャップは次のように示されます：

```
acuSolve: Ave distance = 2.842759e-05  
acuSolve: Max distance = 1.182390e-04
```

意味のある解のためにはギャップは小さくする必要があります。

連成シミュレーションのポストプロセス

連成シミュレーションのポストプロセスのためのいくつかのオプションがあります。

- HyperViewを用いた構造結果とインターフェースの応答、更にHyperViewのようなAcuSolveに適合するポストプロセッサを用いて流体の解とインターフェースの応答のポスト処理を行います。
- 構造と流体の解を統合してポスト処理するにはサードパーティのソフトウェアを用います。

数量のスケーリング

AcuSolveでRadiossから読み込まれる力およびモーメントに倍率を与えることができます。高い慣性効果を伴う流体-構造相互作用シミュレーションを開始する場合には、スケーリングフィールドが役立つ可能性があります。EXTERNAL_CODEコマンドで乗数関数を指定します。

```
MULTIPLIER_FUNCTION("ramp" ) {  
  type = piecewise_linear  
  curve_fit_values = { 1, 0.0 ; 10 , 1 }  
  curve_fit_variable = time_step  
}  
  
EXTERNAL_CODE {  
  ...  
  multiplier_function = "ramp"  
  ...  
}
```

}

ソルバーの並列計算

AcuSolveとRadiossは、分散メモリクラスタ上で並列で実行できます。

プラットフォームのサポート

AcuSolveは、Windows (64-bit)とLinux (64-bit)で実行できます。

制限事項

- dampサーフェスがビーム要素を含む場合、他の要素は減衰サーフェス定義に用いることはできません。つまり、ビーム要素を他の要素と組み合わせて減衰サーフェスを定義することはできません。
- 2次のテトラ要素と修正テトラ要素はサポートされていません。
- 2つのソルバーの間における時間ステップは、一定および固定された時間増分である必要があります。
- 現時点で熱解析はサポートされていません。

準-静的解析の注記事項

準-静的解析(/IMPL/QSTAT)実行の際、剛性マトリックスの正定値特性が、慣性マトリックスを含むことにより補強されます。付加剛性は質量、慣性と時間ステップの関数です。より小さな時間ステップではより大きな剛性となります。加えて、付加質量マトリックスに対するスケーリングファクターが、キーワード/IMPL/QSTAT/DTSCALを通して定義できます（この係数は時間ステップと同様に、この付加されるマトリックスに反比例します）。非線形解析では、これは収束のスピードに影響するだけですが、線形解析では、（1ステップの）時間ステップを注意深く選択する必要があります（小さすぎると結果を大きく変える危険性があり、大きすぎると正定値でないマトリックスとなり得ます）。

このオプションは、接触インターフェースによる結合だけからなるモデルの様に、他の解析タイプではうまくいかない場合に非常に適しています。線形準-静的解析は、ハイレベル（陽解法解析に対しても）のモデルチェックとして用いることもできます。大きすぎない時間ステップを用いて、モデルが正確に拘束されていなくても常に解を得ることができます。

陰解法解析のアクティブ化で述べたように、/IMPL/QSTAT/DTSCALが /IMPL/LINEAR/INTER(2ステップ)と共に用いられた時、そのスケールファクターは第2ステップにのみ適用されます。このスケーリングファクターと終了時間を注意深く選択することにより、最初のステップで正しい接触を見つけ、最後のステップでの（付加された剛性による）誤差を最小化することができます。

この手法を用いた典型的な例題としては、重力を受けるフルカーとダミーで、ダミーが接触のみで車両と結合されている初期状態のシミュレーションがあります。最初のステップの接触検索の間にパート間の大きな変位が生じないように短い終了時間が定義されると、静的解を得るために第2ステップでは大きな準-静的スケールファクターが適用されます。

非線形陰解法解析の注記事項

非線形陰解法解析において、剛性マトリックスの作成と内力の計算(陽解法と同じ)の間で要素の定式が異なる時、収束性の問題がしばしば見られます。これは特に摂動アウグラスでの次数低減積分要素の場合に起こります。これに対し、シェルに対するQEPHとQBAT、またはソリッドに対するHA8、HC8、S8、HEPHなどの同様の定式化の要素では収束解を得ることができます。いずれにしても、同じ定式化が望まれます。

前に述べたように、Radiossでは、全ての利用可能なRadioss材料での剛性マトリックスの作成に、材料パラメータの弾性部分のみが用いられます。弾性剛性マトリックスを用いるもう1つの利点は、(弾塑性の様な)特定の材料で生ずる収束性の問題を避けることができる点です。いくつかの例題のテストで、ラインサーチと共に用いた弾性剛性マトリックスは、非線形材料計算で妥当な収束性を示しています。もちろん、Newton-Raphson 法(接線剛性を用いた方法)も今後追加される予定です。

材料の弾性部分を用いる唯一の例外はスプリング要素の場合で、これらは材料則に関係していません。陰解法解析のばね特性で非線形関数が定義されているとき、接線剛性要素マトリックスが計算されます。しかしながら、非線形解析での収束性の問題を避けるため、弾塑性スプリング($H > 0$)ではなお弾性剛性マトリックスが用いられます。ばね要素のある線形解析で、非線形剛性関数が定義されている場合、この関数の(0, 0を除いた)最初の点のみが考慮されて線形剛性が計算されます。

収束性の問題は、非線形解析では頻繁に起こり、これには制御パラメータが重要な役割を演じます。これらのパラメータは問題に依存し、入力値が計算が収束するか失敗するかを決める可能性があります。品質とパフォーマンスのバランスが取れる値が、最良とされます。

最初に、非線形ソルバーの制御パラメータを入力する必要があります。

このキーワードのフォーマットは:

```
/IMPL/NONLIN/n
L_A Itol Tol
```

2つの非線形ソルバーが利用可能です:

- 修正 Newton 法($n=1$)
- 準 - Newton(BFGS)法($n=2$)

L_A

このパラメータは剛性マトリックスを再構成する最大反復回数を設定します。反復ソルバーではこの値は3が、直接ソルバーでは6が推奨されます。

Itol

反復計算終了の基準

1	エネルギーの相対残差
2	力の相対残差

Tol

相対残差の値が(残差の値対参照値の値で)等しいか、許容値よりも小さくなった時、反復が収束したと判断される許容値。

参照値は0回目の反復で計算されます(出カメッセージ)。

Radiossで、更新された剛性は(非線形材料の弾性パラメータを用いるので)主に形状の意味である点は注意してください。このため、L_Aに対する小さな値は変位増分のレベルによっては速い収束性をもたらしますが、剛性マトリックスの再構成により多くの計算コストを必要とし、特に直接ソルバーを用いた場合はこれに当てはまります。

通常、力の終了基準($Itol = 2$)がバランスの点で良い結果を与え、これがデフォルトの基準となっています。エネルギーの基準は、より容易に収束する可能性があり、単調増加の荷重の下での弾塑性材料のシミュレーションにより向いています。

なぜならこの場合、(これは塑性降伏応力によりもたらされる) エネルギー増加が力の増加よりもより強いからです。その収束性は参照値の同じ変化に対してより容易になります (高い参照値ではより収束は容易になります)。

2番目に、時間ステップコントロールはキーワード `/IMPL/DT/n`と`/IMPL/DTINI`が用いられたときに選択する必要があります。時間ステップコントロールの手法が定義されていない場合には、非線形シミュレーションの間、一定の時間ステップが用いられます (推奨しません)。

時間ステップをより効率的に取り扱うために、2つの自動時間ステップコントロール法が利用可能です ($n=1$, または 2)。最初の方法はラインサーチ法で、収束の反復回数によってのみ働きます。2番目の方法は孤長法のような変位のコントロール法で、一般的な使用に対して推奨されます。

自動時間ステップコントロールがそれぞれのステップ(サイクル)で用いられた時、Radiossソルバーは入力のスケールファクターで自動的にその時間ステップを調節します。反復が発散した場合、Radiossは時間ステップをスケールダウンして反復計算をやり直します。

デフォルトのスケールファクターは0.67(減少の係数)と 1.1(最大増加、即ち、時間ステップが増加される最大の係数)です。

1により近い最大増加ファクター(例えば1.01など)を使用することにより、座屈などの難しい解析に対して収束がより容易になります。

キーワード`/IMPL/DTINI`を用いて、初期時間ステップを定義する必要もあります。これでシミュレーションに必要なおおよそのステップ数を与えます。

非線形シミュレーションの実行には適切な数のステップ数が必要です(一般的に > 100)。これは、以下の理由に基づきます:

1. 幾何学的または接触の非線形性のあるモデルは小さなステップでより容易に収束します。
2. ある材料挙動、特に経路依存のある場合、正確な積分になるためには小さなステップを必要とします。

時間ステップの最小と最大の制限値を`/IMPL/DT/STOP`を用いて設定することも有用です。

<code>DT_min</code>	発散が起きた時に計算を停止。
<code>DT_max</code>	時間ステップの上限を設定。計算はこの値に達しても停止することはないですが、これは高い非線形性のあるシミュレーションの収束または単に出力の必要性のために有用です。

Radiossのリスタートは陰解法解析でも利用化できます。この場合、収束の戦略として異なるパラメータを定義できます。

接触のある非線形解析

接触のある非線形解析では力の相対残差(デフォルト)が推奨されます。

陽解法と同様に、より大きなギャップがより良い収束性をもたらします。これは特にインターフェースタイプ 11に対して当てはまり、時間ステップ減少による計算停止を避けるために十分に大きなギャップの値を設定する必要があります。小さな初期ギャップを有するインターフェースタイプ 7を用いた接触を伴うシミュレーション(例: 重力を受けるスタンピングの初期状態、接触により拘束されるパーツなど)では、`Gap_min_min`を初期ギャップよりも若干大きく取ることでより良い収束性が得られます。初期貫通はただちにリカバーします。

接触が摩擦と共に定義されている場合、増分剛性定式化 ($I_{form}FORM = 2$) が推奨されます。

特に剛体パートを含み、可変形のパートが強制変位で接触するシミュレーションでは、接触のある解析でユーザーが適切な参照値を選択することが難しいため、Radiossが最初の反復で参照値を修正する例外があります。参照残差が大きくなりすぎる場合 ($>> 1$)、Radiossはより小さな時間ステップと高い参照値で反復をリスタートさせます。修正される参照値は

時として予想外に高くなりすぎ、これにより悪い結果での収束になる可能性があるため、ユーザーはそれぞれのステップにおいて反復0で出力することでこの値を試す必要があります。これは接触定義で高い初期貫通が存在する場合にもあてはまります。

インターフェースタイプ 7が用いられた時、接触剛性が収束で重要な役割を果たし、このため、 $I_{stfSTF} = 4$ (接触のために最小のメインとセカンダリ剛性を選択)が推奨されます。これは、前の段落で述べた理由と、ペナルティ接触力が影響を受ける変形部分の内力とつり合うことに起因します。また、有効な剛性に近い剛性は、より高い剛性と比較して収束が容易になる傾向があることを意味します。場合によっては、スケーリングファクターに基づいた剛性の減少(例: $StfacSTFAC$ 0.01など)またはインパクトの厚さが縮小される(剛体など)剛性を使用すると、力の不均衡を低減し、収束が向上する場合があります。これは特に、実効剛性が膜剛性よりはるかに小さい構造や、曲げられているシェル構造などで顕著です。ただし、値が小さ過ぎても発散につながる可能性があるので注意してください。

RadiossとAcuSolveを用いた流体-構造相互作用解析

注：流体-構造直接連成相互作用 (DC-FSI) RadiossおよびAcuSolveのサポートは中止されています。現時点では、OptiStructユーザーズガイドの流体-構造相互作用で説明されているとおり、OptiStructをAcuSolveと組み合わせて用いることが推奨されます。

RadiossとAcuSolveは完全に統合され、直接流体-構造連成相互作用 (DC-FSI) 解析を、分割されたスタagger (partitioned staggered) アプローチで実行することができます。RadiossとAcuSolveは、共に時間領域のシミュレーションコードであり、連成解析を複数の時間ステップに分割します。RadiossとAcuSolveの両方の支配方程式は非線形で、それぞれの時間ステップでサブ反復を必要とします。FSI解析のそれぞれのサブ反復で、AcuSolveでの流体反力は節点力に変換されRadiossの構造インターフェースメッシュに伝達されます。これらの力はRadiossを用いた構造の変形の計算に用いられます。流体流れの反力からの荷重に加えて、付加的な構造の荷重も作用される点には注意が必要です。結果の構造の変形形状は新しい流体境界としてAcuSolveに戻されます。このFSIサイクルを下の図 396に示します。

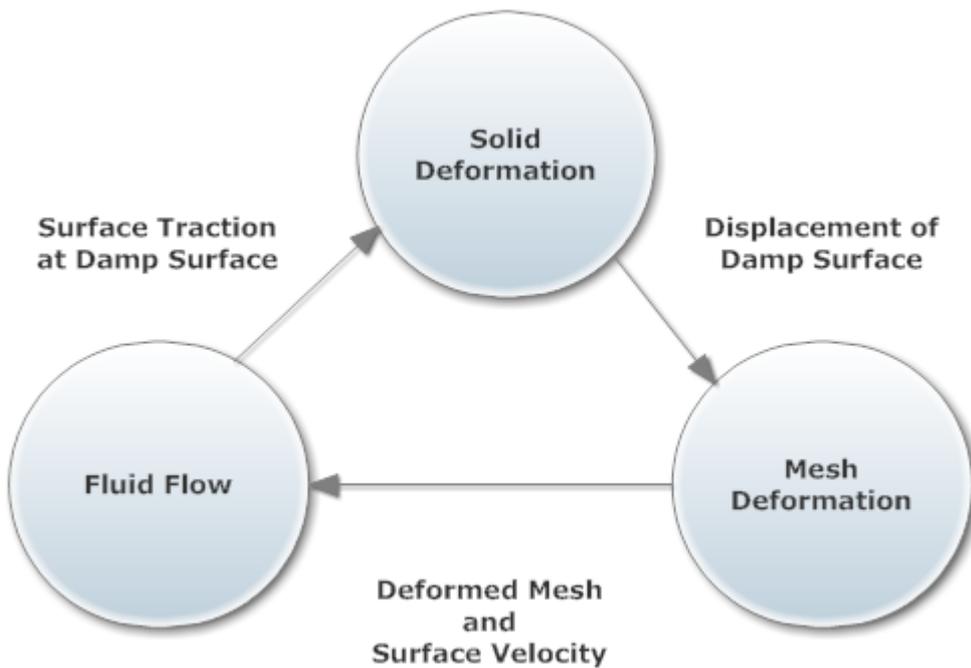


図 396: 直接流体-構造連成相互作用 (DC-FSI) サイクル

適用分野

DC-FSIの能力は複雑な構造の応答に対応した流体流れへの複雑な相互関係のシミュレーションを目的としています。この能力は特に非線形構造応答を表す問題に適しています。これは線形の構造応答に対しても用いることができます。しかし、線形構造応答に対しては、P-FSI解法がAcuSolveにより提供されており、線形化された構造応答を非線形流れの解法でより効率的に解くことができます。P-FSI法のより詳しい情報に関しては、AcuSolveコマンドリファレンスマニュアルを参照してください。非線形材料、非線形幾何学的効果、接触を含むRadioss機能の大部分を用いることができます。インターフェース領域はソリッド、シェル、ビーム要素でモデル化できます。AcuSolveのほとんどの機能はDC-FSIシミュレーションに用いることができます。これらの機能はいわゆる層流または乱流流れ、熱伝導、材料オプションの多くのセット、自由表面やマルチ-スピーズがもたらす流れを含みます。移動境界問題はArbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) とスライディングメッシュテクノロジーを用いてモデル化されます。詳細については、AcuSolveCommand Reference Manualをご覧ください。

この能力のターゲットとなる主な適用分野は以下を含みます：

- 自動車: 流体減衰ラバーマウント、ドアシール、ショックアブソーバー、ラバーダイアフラムとアンチショックブレーキシステムの値の設計
- 石油 / ガス: 長い海洋ライザー、係船、自由なスパンとドリリングライザー
- 航空宇宙: 翼の空弾性、UAVとMAV
- 風力タービン: ブレードの大きな変形
- 消費財: デザインとパッケージング
- バイオメディカル

See Also

[Fluid-Structure Interaction](#)

出力メッセージ

以下は、Engineファイル_0001.radでキーワード/IMPL/PRINT/NONLIN/nが用いられた際の出力の一部 (Engine出力ファイル _0001.outのステップ2)です。

```

CYCLE      TIME      TIME-STEP  ELEMENT  ERROR  I-ENERGY  K-ENERGY T  K-ENERGY R  EXT-W
-----
  2    2.380      0.4802    SHELL    0.0%   5.117      0.000          0.000  5.117
--SUPPLEMENTARY CONTACT STIFFNESS MATRIX IS CREATED--
  WITH DIM. : ND   =    141 NZ   =   1050 NB_MAX =    15
  NL_ITERATION=  0  INITIAL RESIDUAL NORM= 0.5913E+01 0.4613E+04 0.1600E+05
--STIFFNESS MATRIX IS REFORMED --
--SUPPLEMENTARY CONTACT STIFFNESS MATRIX IS CREATED--
  WITH DIM. : ND   =    150 NZ   =   1059 NB_MAX =    15
  NL_ITERATION=  1  RELATIVE RESIDUAL NORM= 0.1000E+01 0.8593E-01 0.5005E-01
--SUPPLEMENTARY CONTACT STIFFNESS MATRIX IS CREATED--
  WITH DIM. : ND   =    156 NZ   =   1101 NB_MAX =    15

CONVERGED WITH 2 ITERATIONS, |du|/|u|, |r|/|r0|, |dE|/|E|= 0.5915 0.4747E-01 0.1166

```

それぞれの反復では正規化された(L2 ノルム)の初期値(反復0)または変位、力、エネルギーの相対値の出力を含んでいます。つまり、 $|du|/|u|$ は変位の相対残差、 $|r|/|r0|$ は力の相対残差、 $|dE|/|E|$ はエネルギーの相対残差です。

剛性マトリックスの設定

全ての計算の初期段階では、以下の情報が出力されます：

```

*----- STIFFNESS MATRIX SETUP -----*
SYMBOLIC DIM : ND = 164202 NZ = 6047160 NB_MAX = 96
FINAL DIM : ND = 154605 NZ = 5652417 NB_MAX = 96

```

ここで、

ND	剛性マトリックスの次元(自由度数)
NZ	厳密な三角行列の非ゼロ値の数(マトリックスの対称性によりND+NZ値のみが保存されます)
NB_MAX	モデル内の最大接続節点数

Radiossは解く前に全ての従属自由度を消去(このプロセスは '縮約'と呼ばれます)、SYMBOLICとFINALの次元は縮約前と後のマトリックスの次元にそれぞれ対応します。

接触が考慮された場合には、ペナルティスプリングの剛性マトリックスは独立して保存され、この情報は(/IMPL/PRINT/NONLIN/nが定義された場合)接触が検知された時に1度出力されます：

```

--SUPPLEMENTARY CONTACT STIFFNESS MATRIX IS CREATED--
  WITH DIM.: ND   =    42 NZ   =    42 NB_MAX =    16

```

 注：最終情報(縮約後)のマトリックス情報のみ出力されます。

Radioss SPMDバージョンでは、それぞれのマシンに保存されるメインの剛性マトリックスのサブマトリックスが出力されます。また、補足的接触マトリックスに関しては、全体の最終的なものだけが出力されます。

- CPU 情報

キーワード/MON/ONがRadioss Engine入力ファイル(_0001.rad)内で定義された場合、陰解法スキームのCPUの計算時間に関する詳細な情報が.outファイルに出力されます：

```

#PROC [K]SETUP [M]SETUP IMPL.SOLV IMPL.TOTAL
  1 .2484E+01 .1528E+02 .6742E+02 .8520E+02
#PROC CONT.SORT CONT. F ELEMENT MAT KIN.COND. INTEGR. I/O TASK0 ASSEMB. RESOL
  1 .0000E+00 .0000E+00 .1875 .3125E-01 .0000 .0000E+00 .2188 .2188 .0000 .8561E
+02

```

```
-----  
ELAPSED TIME :      89.32 s
```

ここで、

[K]	メインの剛性マトリックス
[M]	前処理マトリックス(反復ソルバーが用いられた場合)
IMPL.SOLV	以下の解 $\{x\}=[K]^{-1}\{b\}$

数値の値は時間を表しています。

各反復に対する求解の出力(/IMPL/SOLVおよび/IMPL/NONLIN/SOLVINFO)

求解の各反復でグローバルな求解情報を出力します。このコマンドでは、3つの追加ファイルが作成されます:

Filename_implicit.info	各反復および各増分での最大残差(力およびモーメント)、最大変位および回転増分、最大修正用。
Filename_implicit.hist	Altair Simulationでのプロット用の全データが含まれます。
Filename_implicit.tpl	Altair Simulationで.histファイルのデータをプロットするためのtplスクリプト。

トラブルシューティング

Radiossが以下のエラーメッセージで止まった場合:

このエラーメッセージが出力された時、2つのケースが考えられます。

STIFFNESS MATRIX IS NOT DEFINITE

1. 剛性マトリックス $[K]=[K_0]+[K_g]$ (幾何剛性)が正定値でない。これはある自由度において剛性マトリックスがゼロである時(例えば、スプリングタイプ8の回転自由度の1つがゼロ)、または材料の弾性定数が小さすぎる(モデルで用いられている単位系の一貫性のなさにしばしば関係します)に起こり得ます。
2. 境界条件が与えられた後でもなお、モデルに剛体モードが残っている。これは、このエラーでより一般的な原因です。例としては、接触インターフェースのみで結合された2つのパートや、3自由度のソリッド要素に結合された6自由度スプリング等があります。

シミュレーションは陰解法の解法部分(逆行列)で失敗します、これは反復(PCG)ソルバーでも同じです。

以降では、RADIOSS最初のケースではこれらの自由度を自動的に拘束します(詳しくは*Radioss Engine Input*を参照してください)。

2番目のケースで剛体モードをチェックするには、以下のいずれかの方法で実行します:

- モデルチェック(Engine入力ファイルの/IMPL/CHECKを使用)このチェックの結果は、*n.outにリストされます。
- 十分に大きな時間ステップを指定した線形準-静的解析(直接法ソルバーが向いています)。アニメーションファイルを確認することにより、自由パートを見つけることができます。

以下はこのような剛体モードを消すために可能ないくつかの回避策です:

- 人工的なスプリング(小さな剛性の)で自由パートを結合する。
- 自由パート間にインターフェースが定義されている場合には、接触に若干の初期貫通を与える。
- 準-静的解析を実行する。

次のエラーメッセージはモデルに荷重が定義されていない場合や、非線形解析の最初に時間ステップの間で荷重が0の場合に起こります。

IMPLICIT STOPPED DUE TO LOADING DATA

実行は以下のRadiossメッセージとともに停止されます:

```
**RADIOSS IMPLICIT STOPPED DUE TO LOADING DATA**
ISTOP = 0
```

推奨される回避策は:

1. モデルの荷重をチェックする。
2. 初期時間ステップを増やす。
3. 荷重が接触によるもの場合には若干の初期貫通を与える。

次のエラーメッセージが表示された場合:

TIMESTEP REDUCED DUE TO DE-ACTIVATION

接触のある非線形シミュレーションでは以下のワーニングが出力されることがあります:

```
**TIMESTEP WILL BE REDUCED TO AVOID DE-ACTIVATION IN INTERFACE** : 14
```

このような場合、Radiossは、時間ステップを減少させて反復をリスタートしますが、結局、その時間ステップが事前定義の最小値にまで落ち込んだ場合には、実行は失敗します。これは通常、インターフェースタイプ11(エッジとエッジの接触)における小さなギャップの時に見られます。

```
** ERROR : RADIOSS IMPLICIT STOPPED DUE TO MODELING DATA **
```

```
ISTOP=      -1
```

このメッセージは通常、別のモデリングエラーメッセージに続いて表示されます: "STIFFNESS MATRIX IS NOT DEFINITE", "...TOO LARGE ENERGY VALUE".

多くの場合、拘束条件に関するものであるか、時間ステップが大きすぎることを示しています。

```
**ERROR: RADIOSS IMPLICIT STOPPED DUE TO TIMESTEP LIMIT**
  ISTOP =      -2
```

時間ステップが入力の最小時間ステップより小さい場合(/IMPL/DT/STOPを参照)、Radiossは、このメッセージを出力し、実行を停止します。

原因は一般的に収束性の問題(DT_min)で、DT_minが既に十分に小さかったかどうかです。以下に概説するように、収束性の問題については一般的な回避策はありません:

1. outファイルに出力を追加し(/PRINT/nをn=1に設定、あるいは/IMPL/PRINT/NONLIN/nを n=1に設定するなど)、エラーの原因を解析します。
2. モデル、拘束条件、材料、接触インターフェースの定義などをチェックします。
3. エラーが不安定性が原因で発生した場合は、スナップスルータイプのシミュレーションについては /IMPL/DT/3 (Riks法)、一般的な不安定性の問題については /IMPL/QSTATを試します。
4. 可能であれば、他の収束判定基準に切り替えるか(Itol、/IMPL/NONLIN内を参照)または許容値を緩めます。
5. /IMPL/NONL/SMDISPを試し、問題が幾何学的非線形から発生しているかどうかを確認します。

```
IMPLICIT STOPPED DUE TO SOLVER ERROR
```

実行は以下のRadiossメッセージとともに停止されます:

```
**ERROR: RADIOSS IMPLICIT STOPPED DUE TO SOLVER ERROR**
  ISTOP =      -4"
```

推奨される2つの回避策は:

1. /IMPL/SOLVERで使用されているソルバー手法を確認します。SMP実行で直接ソルバー(BCS)が使用されていますか? その場合は、別のソルバー手法を使用してください。
2. このほかによく見られるのが、モデルが比較的大きいものに対し、使用可能な空きディスクスペースが十分でない場合です。この場合、作業スペースの空きボリューム(. /の、TMPDIRが定義されている場合)を確認します。問題がメモリ管理で発生した場合は、Radiossに強制的にout-of-core解法(/IMPL/SBCS/OUTCOREを使用させることもできます)。

上記の回避策を実行してもこのエラーが解決しない場合は、Altair Simulationサポートチームにご連絡ください。

BCSまたは混合ソルバー(BCSを使用する)を使用していた場合は、実行されているシェルの画面にBCSエラーIDが出力されるため、このIDをサポートチームに報告してください。

Appendix

陰解法解析のEngineファイルの例

線形静解析

```
# RADIOSS ENGINE
/TITLE
Implicit linear computation
/RUN/PLABUCK/1
0.1
/VERS/140
/TFILE
0.0001
/PROC/1
/PRINT/-1
/ANIM/DT
0. 0.01

/IMPL/PRINT/LINEAR/-100
#Linear solver method (Direct solver MUMPS)
/IMPL/SOLVE/2
# Iprec It_max Itol Tol
5 0 3 0.0
# 1 0 0 0.
/IMPL/BUCKL/1
1.0e-10 0. 20 2 0 1.e-4

/ANIM/VECT/DISP
/ANIM/ELEM/ENER
/ANIM/ELEM/EPSP
/ANIM/ELEM/VONM
/ANIM/TENS/STRESS/MEMB
/ANIM/TENS/STRESS/BEND
/ANIM/GZIP
/MON/ON

Nonlinear Static Analysis
# RADIOSS ENGINE
/TITLE
Implicit computation
/VERS/140
/RUN/pcompp_rad_s1/1
0.1000000E+01
/ANIM/DT
0.0000000E+00 0.1000000E+00
/TFILE
0.1000000E-01
/RFILE
5000
/PRINT/-1

/MON/ON
/ANIM/VECT/DISP
/ANIM/ELEM/EPSP
/ANIM/GZIP

#-----
# STATIC Non-Linear IMPLICIT OPTIONS #
#-----
# Printout frequency for nonlinear computation:
/IMPL/PRINT/NONL/-1
# Static nonlinear computation (modified Newton method):
/IMPL/NONLIN/1
# L a Itol Tol
0 2 0.5000000E-01
# Linear solver method (Mix):
/IMPL/SOLVER/5

#Initial timestep:
/IMPL/DTINI
0.1000000E+00
# Min-max values for timestep:
/IMPL/DT/STOP
# Dt min Dt_max
0.1000000E-04 0.3000000E+00
# Timestep control method 2 (arc-length + line-search):
/IMPL/DT/2
```

```
# It_w L_arc L_dtn Scal_dtn Scal_dtp_max
6 0.0000000E+00      20 0.6700000E+00 0.1100000E+01

/END/ENGINE
```

非線形静解析

```
#-----
# STATIC Non-Linear IMPLICIT OPTIONS #
#-----
# Printout frequency for nonlinear computation:
/IMPL/PRINT/NONL/-1
# Static nonlinear computation (modified Newton method):
/IMPL/NONLIN/1
# L_a Itol Tol
0 2^-0.5000000E-01
# Linear solver method (Mix):
/IMPL/SOLVER/5

#Initial timestep:
/IMPL/DTINI
0.1000000E+00
# Min-max values for timestep:
/IMPL/DT/STOP
# Dt_min Dt_max
0.1000000E-04 0.3000000E+00
# Timestep control method 2 (arc-length + line-search):
/IMPL/DT/2
# It_w L_arc L_dtn Scal_dtn Scal_dtp_max
6 0.0000000E+00      20 0.6700000E+00 0.1100000E+01

/END/ENGINE
```

流体と流体-構造シミュレーション

ここでは、流体および流体-構造シミュレーションについて紹介します。

ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) と CFD (Computational Fluid Dynamics)

ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) と CFD (Computational Fluid Dynamics) シミュレーションでは、以下の現象をモデル化できます：

- 過渡解析
- 層流と乱流 ($k-\epsilon$ モデル、LES Smagorinsky)
- 圧縮性と準圧縮性流れ
- 熱伝導
- 流体 / 構造連成
- 多相材料

最も用いられる適用分野は：

- 古典的な流れの解析
 - 内部流れ
 - 空力学
 - 自由表面
 - 障害物のある開水路
 - 高速の工具
- 流体 / 構造連成相互作用
 - バルブ
 - エギゾーストノイズ音源推定
 - レーザー溶接
 - 原子力事故
 - 防衛関係

ALE キーワードのサマリー

通常の Radioss キーワードは、関連する節点で材料に作用します。先頭に /ALE が付くすべてのパラメータは、節点に直接作用します。

内容

指定した材料則を使用して ALE 定式化をアクティブにするには、以下を追加します：

- [/ALE/MAT](#)

ALE 定式化では、グリッド定式化を定義する必要があります：

- [/ALE/GRID/DONEA](#)

- `/ALE/GRID/DISP`
- `/ALE/GRID/SPRING`
- `/ALE/GRID/STANDARD` (推奨)
- `/ALE/GRID/ZERO`

Euler定式化は、以下の2つの方法で定義できます。この場合、節点は固定されたままとなります：

- `/ALE/MAT + /ALE/GRID/ZERO`
- または `/EULER/MAT`

モデリングに関する問題は、材料速度とグリッド速度の両方について、境界条件を使用して適切に設定されます：

- `/BCS` (節点に材料速度を拘束)
- `/ALE/BCS` (節点にグリッド速度を拘束)
- `/EBCS` (要素の状態を拘束)

`/ALE/BCS`を使用するかLagrangian要素を結合することによって、ALEパート内のLagrangian節点を定義することもできます。

グリッド速度へのリンクを定義するには、以下を使用します：

- `/ALE/LINK/VEL`

これは、FSIにおいて、ウィンドウにALEグリッドで可動自由構造をモデル化する場合によく使用されます。例えば着水では、限定されたALE領域を、結合された自由な構造にリンクできます。この利点は、それが材料速度のない初期状態であるため、水および空気の流入が一定だということです。

固有のALEインターフェースは以下のとおりです。

- `/INTER/TYPE1` (Lagrangianサーフェス上のALE節点)
- `/INTER/TYPE9` (指定されたALE自由サーフェスとのLagrangianサーフェスの結合)
- `/INTER/TYPE12` (2つのALEサーフェス(メイン側およびセカンダリ側)の間の流動の伝達を可能にします)
- `/INTER/TYPE18` (Lagrange構造との連成)
- `/INTER/TYPE22` (カットセル法、ベータリリース)

ALE定式化またはEULER定式化と適合性がある材料則は、以下の6つのみです：

多相材料則

- `/MAT/LAW37 (BIPHAS)` (二相材料液体ガス)
- `/MAT/LAW20 (BIMAT)` (一般的な2次元二相材料則)
- `/MAT/LAW51 (MULTIMAT)` (一般的な3次元多相材料則、散在型スキーム)

多相材料則

- `/MAT/LAW26 (SESAM)` (SESAME-Johnson-Cook材料)
- `/MAT/LAW151 (MULTIFLUID)` (一般的な3次元多相材料則、連結型スキーム)

境界材料則

- `/MAT/LAW11 (BOUND)` (流入 / 流出材料)

温度則

- `/MAT/LAW18 (THERM)` (熱材料)

ALE/EULER解析では、上記のALE材料のほかに、次のような材料則を使用できます。

- `/MAT/LAW2 (PLAS_JOHNS)`
- `/MAT/LAW3 (HYDPLA)`

- /MAT/LAW4 (HYD_JCOOK)
- /MAT/LAW5 (JWL)
- /MAT/LAW6 (HYDROまたはHYD_VISC)
- /MAT/LAW10 (DPRAG1)
- /MAT/LAW11 (BOUND)
- /MAT/LAW16 (GRAY)
- /MAT/LAW21 (DPRAG)
- /MAT/LAW37 (BIPHAS)
- /MAT/LAW41/1
- /MAT/LAW46 (LES_FLUID)
- /MAT/LAW49 (STEINB)
- /MAT/LAW51 (MULTIMAT)
- /MAT/LAW75 (POROUS)
- /MAT/LAW80

体積比率の再構築のための2次MUSCLスキームは、以下により呼び出すことができます：

- /ALE/MUSCL

流入 / 流出を定義するには：

- /EBCS
- /MAT/LAW11 (BOUND) (LAW37またはLAW51を使用する場合を除く、一般的なケース)
- /MAT/LAW37 (BIPHAS) (多相材料則LAW37を使用する場合は要素定式化をご参照ください)
- /MAT/LAW51 (MULTIMAT) (多相材料則LAW51を使用する場合は要素定式化をご参照ください)

節点に位置する材料の初期速度を定義するには、以下を使用します：

- /INIVEL (散在型スキーム)

連結型スキーム (LAW151) の初速度は、以下を使用して定義できます：

- /INIVEL/FVM

材料LAW151のサイレント流出境界条件は、以下を使用して設定できます：

- /EBCS/FLUXOUT

材料LAW151の流入境界条件は、以下を使用して設定できます：

- /EBCS/INLET

重力による静水圧場は、以下を使用して初期化できます。

- /INIGRAV

以下を使用して、材料LAW51およびLAW151の副材料の初期体積比率を定義することもできます：

- /INIVOL

速度および熱力学値は、以下を使用してALE領域にマッピングできます：

- /INIMAP1D (1Dから2Dへ、または1Dから3Dへのマッピング)
- /INIMAP2D (2Dから3Dへのマッピング)

ALE固有の剛壁は以下のとおりです：

- /RWALL/THERM

内力計算のための有限体積法は、以下を使用してアクティブにできます：

- `/ALE/SOLVER/FINTIform=2`

平行6面体以外のための、より正確な結果を導き出します。理論マニュアルの[Reduced Integration Method](#)で、低減積分定式化のためのデフォルトの定式化をご参照ください。

爆発の適用については、以下のキーワードを使用できます：

高性能爆薬の多相材料則

- `/MAT/LAW5 (JWL)`
- `/MAT/LAW41/1`
- `/MAT/LAW51 (MULTIMAT)`
- `/MAT/LAW151 (MULTIFLUID)`

高性能爆薬の点火

- `/DFS/DETLINE` (爆発ライン)
- `/DFS/DETPLAN` (平面波)
- `/DFS/DETPPOINT` (爆発位置)
- `/DFS/WAV_SHA` (波型回路)

レーザーと物質の相互作用については、以下のキーワードを使用できます：

- `/DFS/LASER` (レーザービーム)
- `/MAT/LAW26 (SESAM)` (SESAME-Johnson-Cook材料 - 適合性のある材料のみ)

Radiossでは、以下の状態方程式を使用できます：

- `/EOS/COMPACTION`
- `/EOS/OSBORNE`
- `/EOS/LINEAR`
- `/EOS/POLYNOMIAL`
- `/EOS/GRUNEISEN`
- `/EOS/PUFF`
- `/EOS/TILLOTSON`
- `/EOS/NOBLE-ABEL`
- `/EOS/IDEAL-GAS` または `/EOS/IDEAL-GAS-VE`
- `/EOS/STIFF-GAS`
- `/EOS/LSZK`
- `/EOS/MURNAGHAN`
- `/EOS/SESAME`

以下を使用して、ALE計算で指定されたパートをアクティブ化または非アクティブ化できます。

- `/ALE/ON`
- `/ALE/OFF`

定式の選択

連続体の運動の記述が、連続体の変形と計算領域のメッシュの間を決めます。連続体力学の研究では、通常2つの古典的な移動の表現を用います：

- Euler表現

- Lagrange表現

ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 表現はその後、上の古典的な運動表現の利点を組み合わせ、それぞれの欠点をできる限り最小にするために開発されました。

Euler定式化

Eulerian定式化は流体力学において古典的な表現です。メッシュは固定され、材料がメッシュの中を流れます。方程式は対流項を考慮するため、Lagrange定式化に関して修正されます。

これは材料データでのフラグにより、特定のパートに対してアクティブ化されます。

/EULER/MAT/mat_ID

ここで、

mat_ID Euler定式化がセットされる材料のID

Euler定式化の要素では移動境界はインターフェースの取り扱いが困難です。Euler定式化は領域移動の境界のある多くのケースでは使うことができません。

Lagrange定式化

Lagrange定式化は構造解析において古典的な表現です。メッシュは材料の点に固定され、材料の変形に従います。材料（構造）とメッシュの間の滑りは許されません。荷重と境界条件は容易に材料の点（節点）に与えることができます。

Lagrange表現では自由表面と異なる材料間のインターフェースを容易に追跡することができます。しかしながら、構造がひどくゆがんだ時、Lagrange定式化の要素も材料の変形に従うため同様にゆがみます。したがってこれらの場合、Lagrangianシミュレーションの精度とロバスト性は大幅に低下します。

これがRadiossでのデフォルト定式化で、材料がEuler(/EULER/MAT/mat_ID option)としても、ALE(/ALE/mat_ID option)としても定義されていない場合、材料はLagrangeです。

ALE定式化

ALEは、Arbitrary Lagrangian-Eulerian定式化を表しています。材料は任意に移動するメッシュの中を流れます。材料とメッシュの両方が実験的に移動します。LagrangeとEuler定式化の組み合わせの様に見ることができます。

この定式化は、材料データでのフラグにより、特定のパートに対してRadioss内でアクティブ化されます：

/ALE/MAT/mat_ID

ここで、

mat_ID ALE定式化がセットされる材料のID

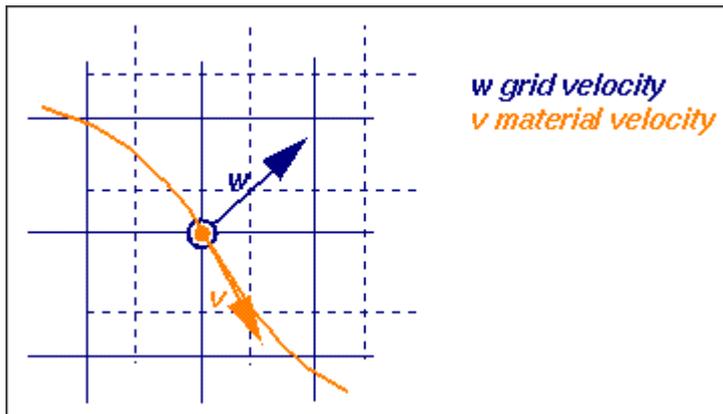


図 397: 任意のグリッド速度と変位

実際、ビルトインのアルゴリズムでALE領域境界の変位に基づいてスムーズなグリッド変形が決められます。いくつかのアルゴリズムが利用可能です (DONEA、SPRINGS、DISP、ZERO)。

ALE定式化はLagrangian ($w=u$: グリッド速度が材料速度と等しい)、またはEulerian ($w=0$: グリッド速度が0に設定される)で縮退させることができます。

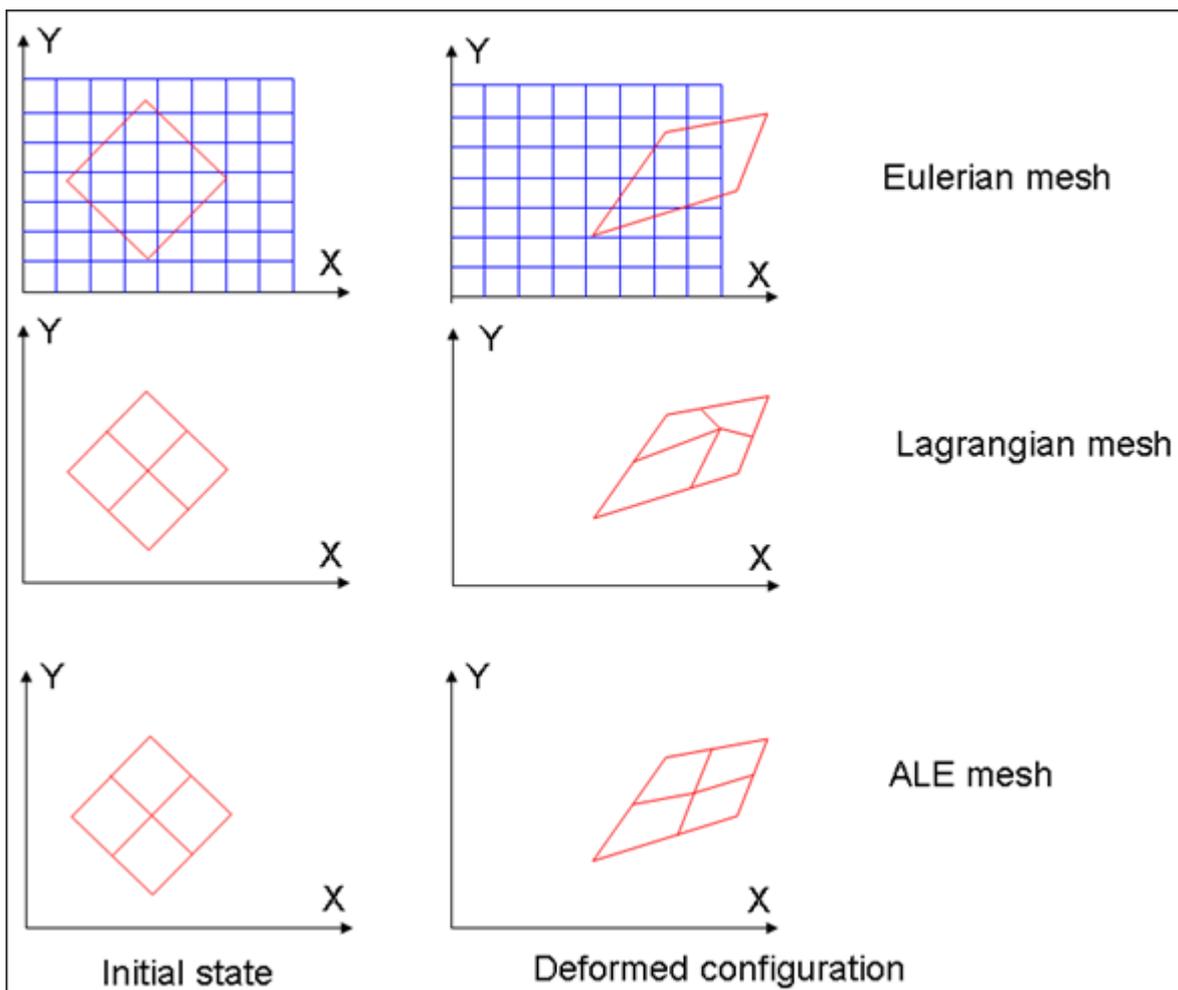


図 398: Euler、LagrangeとALEメッシュ

ALEとLagrange材料の間の境界節点はLagrange(グリッド速度と材料速度が等しい)に設定される必要があります。ALEとEuler材料の間の境界節点ではグリッド速度を0に設定する必要があります。

両方の条件は/ALE/BCSオプションを用いて設定します。ALE節点の拡張境界条件を指定できます(グリッド速度成分が0または材料速度に設定できます)。グリッド速度はALEリンクに古典的な運動条件と同様の方法で与えることができます(Engineの/VEL/ALEオプション)。

 注: ソリッド要素がシェル要素に結合されている場合、結合されている節点は自動的にLagrangeとして設定されます。

流体 / 構造結合

流体がシェルに接触する場合、少なくとも1列のALE要素が用いられる必要があります。

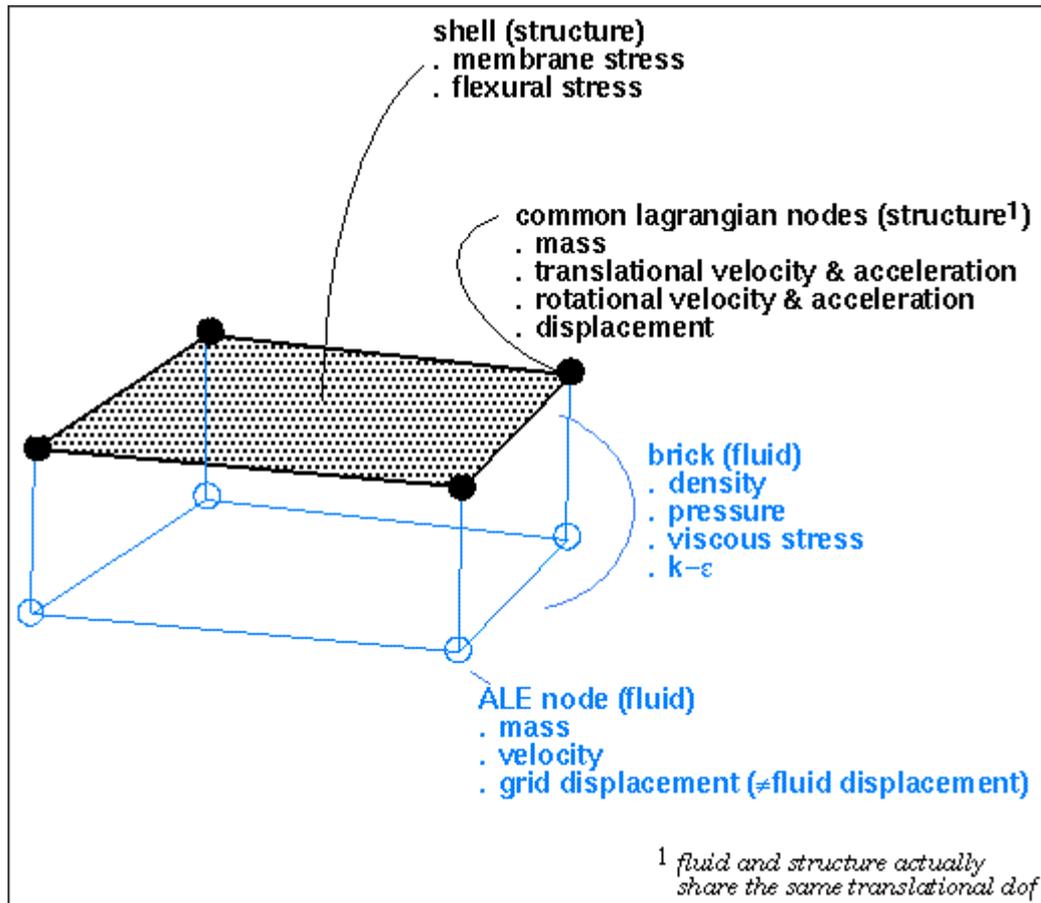


図 399: 流体-構造連成相互作用のメッシュの例

手法

このセクションの目的は、正しいRadioss ALE/CFDモデルを生成するためのいくつかの手順を示すことにあります。

CADクリーニング

通常、構築するモデルに対応するCADモデルを受け取ることになります。最初のタスクは、このCADモデルをクリーンにして単純化することです:

- 自動テトラメッシュを用いてサーフェスを追加して閉じたボリュームにする

- メッシュの引き延ばしを制御してサーフェスを追加する
- パッチサーフェスでメッシュゾーンを準備する
 - 解くことが可能なサイズよりも小さい詳細部分を削除する
 - サーフェス上の線の拘束を可能な限り除去する

メッシュ生成

ヘキサ要素(または2次元解析では四角形要素)のみがALEまたはEuler定式化には適合します。メッシュ生成において、通常のテクニックはそれぞれの考慮する領域においてメッシングの最初に三角形の外表面を作成し、次に内部ボリュームに対しをテトラメッシュを自動生成し、最後にそのテトラ要素をそれぞれ4つのヘキサ要素に分割することです(要素数を注意深く監視します)。三角形メッシュサイズはテトラ要素のために、計画したメッシュサイズの3.5倍より大きくするべきです。

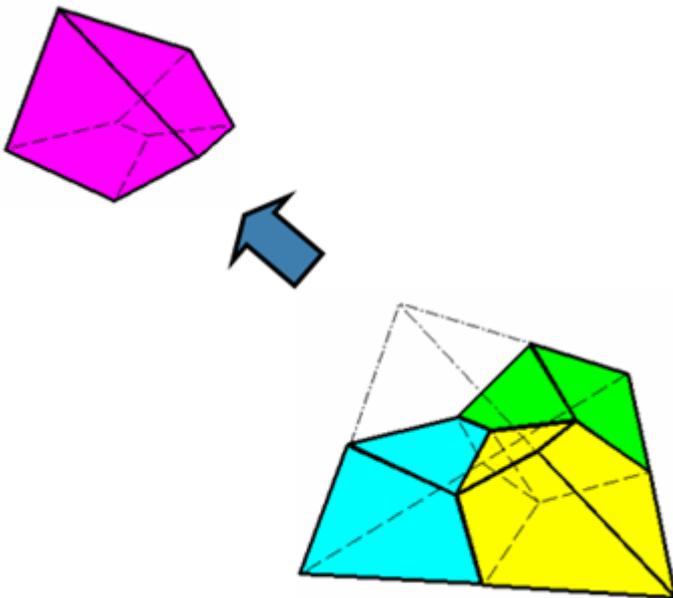


図 400: テトラのヘキサメッシュへの変換

このリメッシュ機能は、HyperWorksの"split"の中にあります。テトラ要素を6面体要素にリメッシュするには、**split into hexas**を選択します。

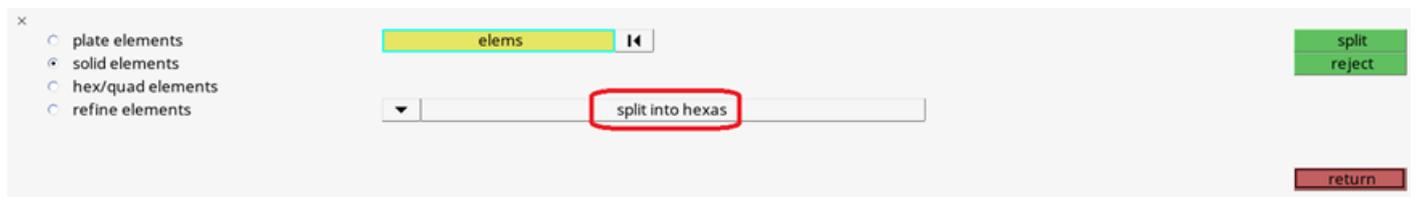


図 401:

必要な場合にはいくつかの引き延ばしを追加します、例えば:

- 流出
- 流入
- サイレント境界(NRF)
- チューブ

もちろん、ヘキサ要素が生成できる場合には、他のテクニックも使うことができます。

- 伝播方向に沿って波長当たり6要素

例: $f_{\max} = 600 \text{ Hz}$, $c=300 \text{ m/s} \geq h \sim 8\text{cm}$

トレードオフ

利用可能なCPUの中でのシミュレーションの全時間と限界時間ステップでは、時間ステップはCourantの安定条件を満足するように自動的に設定されます:

$$dt = \text{Min}(h) / c$$

全計算時間はモデル中にある最小要素の周波数の倍数となります。全CPU時間はサイクル数(終了時間を時間ステップで割ったもの)、要素数、およびそれぞれの要素当たりの計算コスト(計算機に依存)に比例します:

$$T = N_{\text{cycle}} * N_{\text{elem}} * \text{Cost} / \text{cycle} / \text{elem}$$

実際には、シミュレーションのサイクル当たりのコストを知るために、大きなシミュレーションを開始する前に数サイクルの実行を行うことが推奨されます(初期化の時間を差し引くことを忘れないでください)。

障害物回りの空気の流れ(下の図)が検討され、シミュレーションの目的がメッシュのいろいろな位置の流れによって生成される騒音を測ることである場合を考えます。そのメッシュは少なくとも4つの異なる領域からなる必要があります(メッシュ生成):

- 粗いメッシュ(障害物のすぐ周りを除いた全計算領域)
- 再分化されたメッシュ(障害物近傍)
- 流入要素(1列の要素)
- 流出要素(1列の要素)

流れの中の障害物の特性長さで、一般的に3つのメッシュゾーンに分かれます:

ゾーン	典型的な要素サイズ	註:
非常に細かい	a	障害物のように選択されたものはそれぞれの方向で最小20セルで離散化
細かい	2aから3a	
粗い	4aから6a	粗いセルが、着目する最大周波数の対流の近似であることを確認してください。

問題で着目する最高周波数がfの場合、下記より大きいセルがメッシュ内にあってははいけません:

$$\text{Size of element} < C / 10.f$$

ここで、

C 流体中の音速

流入と流出要素の厚さは、計算領域の隣接要素の1/10であるべきです。

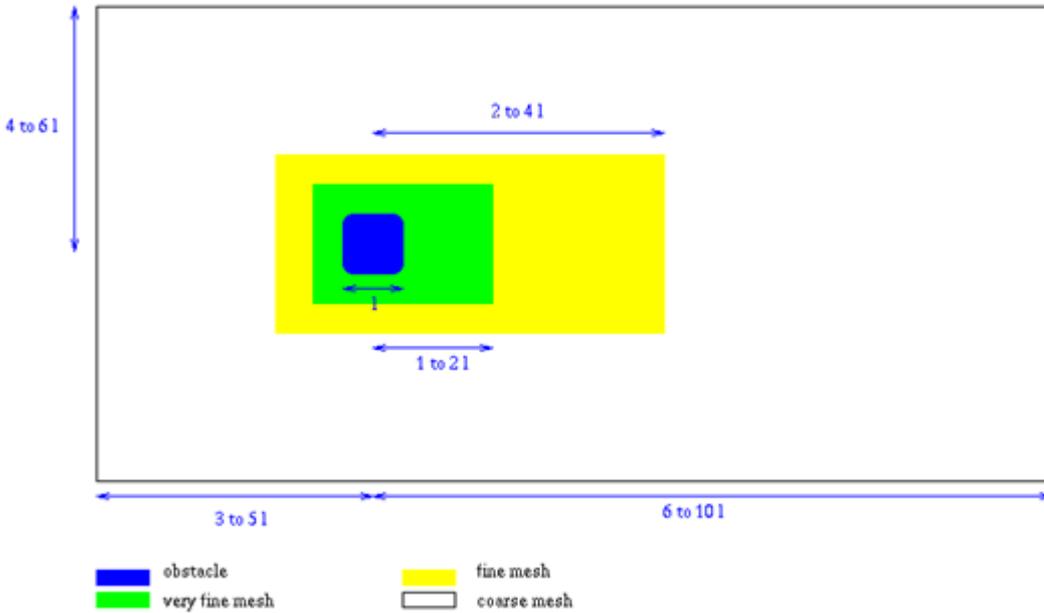


図 403: CAA問題のための典型的なメッシュでの要素数(特定の適用対象では変化します)

低Mach数の問題(0.2より小さい)では、満足な結果は準-圧縮性の仮定の下で得ることができます。これは計算時間の節約になります。圧縮性は、Navier-Stokes方程式が波動方程式を含むことを示しています。そのため、音と流体流れを同時に取り扱うことが可能で、高い数値精度を得ることができます。準-圧縮性は、輸送の項が運動量方程式を除いて無視されることを意味します。したがって、流体材料則の中の C_{11} を減らすことにより、音速が減少して時間ステップが増加します(例えば、 C_{11} の値を10分の1にすることにより、時間ステップは約3倍になります)。

時間積分

Newmark法に基づいた陽的時間積分は条件的に安定です。Courant条件から要素を通り抜ける材料の流れも考慮して次のような安定条件が与えられます:

$$\Delta t \leq S_f * \frac{\Delta l}{c + v - w} \tag{290}$$

$$v - w = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^3 \sum_{l=1}^N (v_i^l - w_i^l)^2} \tag{291}$$

ここで、

N 考慮された要素の節点数

そのスケールファクターを多相材料用に0.7と0.5に減らすことが必要になります。

空間積分

アンチアワグラスと接触力のある並進速度に対する全体の運動方程式は次のように書き表されます:

$$\mathbf{M} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \mathbf{F}_{ext} - \mathbf{F}_{int} + \mathbf{F}_{bod} + \mathbf{F}_{hgr} + \mathbf{F}_{cont} + \mathbf{F}_{trm} \tag{292}$$

ここで、

\mathbf{F}_{trm} 次のように与えられる輸送運動量ベクトル

$$\mathbf{F}_{trm} = \sum_{elements} \mathbf{f}^{trm} \tag{293}$$

$$\mathbf{f}_{il}^{trm} = (1 + \eta_I) \cdot \int_v \rho \cdot \Phi_I(w_j - v_j) \cdot \frac{\partial v_j}{\partial x_j} dV \tag{294}$$

上の式で定義された全てのマトリックスとベクトルは空間領域で積分されます。質量マトリックスは密度と領域が時間で変化するため一定ではありません。Peclet数として知られたメッシュパラメータが限界値を超えると、方程式の解は振動することが示されています。この空間の安定性は数値的な拡散をスキームに付加することで回避可能で、そうでない場合は一般的に拡散が足りず、このように不安定になります。材料入力に運動量風上係数が定義されます。完全な風上の場合 (coef=1)がRadiossのデフォルト値で、一般的に用いられます。

1つの風上テクニックがRadiossで可能です：

- Petrov-Galerkin法による流線風上 (SUPG) :

SUPGは形状関数の運動量の対流項を考慮した修正から成ります。バージョン2018より、SUPG定式化はデフォルトで有効とされています。SUPGは、Engineファイルオプションによりオフにすることができます：

/UPWM/SUPG

ALEグリッド計算

ALE定式化では、メッシュの移動自由度がLagrangeとEuler定式化のそれぞれの利点の組み合わせを補助するために優位に働きます。しかしながら、特定の問題を考慮しながらそれに合ったグリッド速度を指定するのは簡単ではありません。そのため、ALE表現の実際的な実装には自動的なメッシュ移動を規定するアルゴリズムを必要とします。

Radiossでは、以下の自動グリッド計算があります。

/ALE/GRID/DONEA

これはほとんどの問題に適用可能な標準的な方法です。これは、隣接接点の材料とグリッド速度の組み合わせに基づきます：

$$W_I(t + \Delta t/2) = \frac{1}{N} \sum_J W_J(t - \Delta t/2) + \frac{1}{N^2} \frac{\alpha}{\Delta t} \sum_J L_{IJ}(t) \sum_J \frac{u_J(t) - u_I(t)}{L_{IJ}(t)} \tag{295}$$

ここで、

$$1 - \gamma \leq \frac{W}{v} \leq 1 + \gamma \tag{296}$$

N 次の節点に結合された節点の数：

L_{IJ} 右記の2つの節点間の距離； I および J

α および γ 入力で指定されている寸法係数

したがって、グリッド変位は次のように与えられます：

$$u(t + \Delta t) = u(t) + w \left(\frac{t + \Delta t}{2} \right) \Delta t \tag{297}$$

/ALE/GRID/DISP

平均移動の定式化で平均移動を決める平均速度を計算します。

$$w(t + \Delta t) = \frac{1}{N} \sum_J W_J(t) \quad (298)$$

/ALE/GRID/SPRING

それぞれのグリッド節点は隣接するグリッド節点と図 404に示されたのと同様な非線形粘性スプリングを通して結合されます。

それぞれのスプリング剛性は $M \Delta t_{02}$ (ここで M は節点の質量で、 Δt_{02} はユーザー入力の典型的な時間ステップ) で与えられ、スプリングの粘性と、スプリングせん断剛性と引張り-圧縮剛性の比を定義することができます。

これらのスプリングはグリッド節点速度にのみ関係し、材料速度には影響しない点に注意してください。

この方法は非常に正確でロバストですが、CPU時間は非常に高くなります。

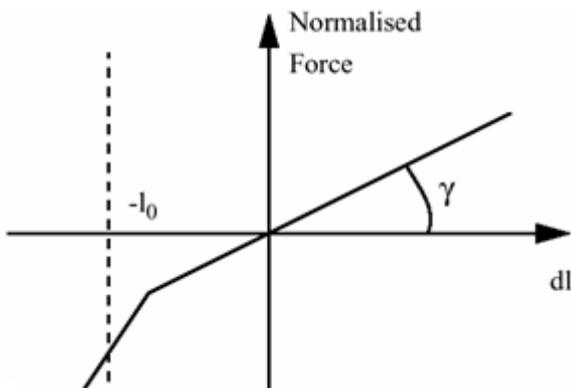


図 404: スプリング力のグラフ

/ALE/GRID/ZERO

グリッドに対して、自動グリッド計算は行われません。グリッド速度は一定(初期グリッド速度が与えられない場合は0となり、それによって定式化はEulerとなります)、もしくは、パートにプロパティタイプ15で剛体移動を与えます。

ALE/CFD材料

以下の材料則が、RadiossでのALE/CFDシミュレーション共通で用いられます:

- $k - \varepsilon$ モデルを用いたNewton流体または乱流粘性流体(/MAT/K-EPSでLAW6をアクティブ化)
- Large Eddyシミュレーション(LES)の計算領域のための粘性流体(/MAT/LAW46 (LES_FLUID)でLAW46をアクティブ化)
- 要素境界条件(/MAT/LAW11 (BOUND)でLAW11をアクティブ化)
- 乱流の場合の要素境界条件(/MAT/B-K-EPSでLAW11をアクティブ化)
- 純温度材料(/MAT/LAW18 (THERM)でLAW18をアクティブ化)
- 二相材料(/MAT/LAW20 (BIMAT)でLAW20をアクティブ化)
- 流体 - 気体の二相流体(/MAT/LAW37 (BIPHAS)でLAW37をアクティブ化)
- 固体、流体、気体の多相材料(/MAT/LAW51 (MULTIMAT)でLAW51をアクティブ化)
- 固体、流体、気体の多相流体(/MAT/LAW151 (MULTIFLUID)でLAW151をアクティブ化)

多くのパラメータはデフォルトで既に定義され、正確な結果をもたらします。これらのパラメータを再定義する必要はありませんが、物理的特性を材料や用いている単位系と関連性を持つように調節することができます。

$k-\varepsilon$ モデルを用いた乱流

乱流 (Reynolds方程式) の基本的な考え方では、実際の流体流れの速度をその平均的な成分と変動分に分離し、変動分平均速度に比べて小さいと仮定します。等方性乱流理論は次にこれらの仮定の等価性を証明し、乱流粘性に付加的な粘性項を導入しています (Boussinesq近似)。

L.E.S.材料

Reynolds方程式に基づいた乱流モデルでは平均量を変動分から分離し、意図的に定常解を強制しています。

流れが大きな構造を含む時はいつも、変動分は平均量と比較した時に無視する事ができません。このため、Reynolds方程式はそのようなシミュレーションを正確に扱う事ができません。

Large Eddyシミュレーション (LES) は異なります。定常状態や平均流は探索されません。グリッドのメッシュは乱流を部分的に解いていると仮定されます。少なくともマクロ構造については、より小さいスケールが粘性項で置き換えられたとしても (サブグリッドスケール)、マイクロ対流の主な逸散効果をモデル化していると考えます。

LAW46はLarge Eddyシミュレーションのために設計されました。Radiossは、Smagorinskyサブグリッドスケールモデルと共に用いることができます: ($I_{sgs}=1$ または 2) またはなしで: ($I_{sgs}=0$) (MILESアプローチ) 状態方程式は線形圧縮 (一定の圧縮性) で、亜音速の場合に適しています。

節点に結合された全ての要素は、固定またはLagrangeの場合、自動的に壁要素として考慮され、それらの粘性は常に対数速度プロファイルに設定されます。

密度、音速、分子動粘性係数、サブグリッドスケールモデルタイプ (TYPE2が推奨されます) とサブグリッドスケール定数 (デフォルトは0.1) を与える必要があります。

[#unique_404/unique_404_Connect_42_ale_cfd_materials_r_table_tzs_fch_rpb](#) は、さまざまな用途に対して使用可能なさまざまな材料の概要を示しています。

		多相材料則		LAW20	LAW51	LAW151
Mach数		低 ($M \ll 1$)		✓	✓	
		高 ($M \gg 1$)		✓	✓	✓
関係するソリッド材料		偏差応力	(砂、鉄、...)	✓	✓	
解析	2D	QUAD			✓	✓
		Tria	✓		✓	
	3D	四面体要素				✓
		Hexa			✓	✓
数値スキーム				スタaggerド	スタaggerド	連結型
解法				ハイブリッドFEM/FVM	ハイブリッドFEM/FVM	フルFVM
全エネルギー保存						✓

	多相材料則	LAW20	LAW51	LAW151
フェーズの離散化		フェーズ のインター フェース追跡	2次 (MUSCLA ルゴリズム)	2次 (MUSCLA ルゴリズム)

√ : あり、空白: なし

See Also

[Materials/Failure \(FAQ\)](#)

準-圧縮性オプション

準-圧縮性オプションでは、密度とエネルギーが一定と仮定されます。

移流拡散は計算されません:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \nabla \mathbf{u} \quad (299)$$

それゆえ、パフォーマンスは改善され、より少ない計算時間しか必要としなくなります。

準-圧縮性オプションはRadioss Engineファイルで/INCMPによってアクティブ化されます。

このオプションを使用すると、音波は圧縮性のケースと同じほど正確に伝播します。しかしながらこれは、 $k-\epsilon$ 乱流モデルと組み合わせて用いることはできません。

乱流壁

乱流壁要素は $k-\epsilon$ モデルの拡散方程式と共に系の完結を定義します。

乱流壁条件は少なくとも1つの節点に固定境界条件(111)またはLagrange条件(.....111)。

シェルに結合された自由節点に対して、これらは明らかにLagrangeですが、Radioss入力内でLagrange条件を明示的に宣言する必要があります。

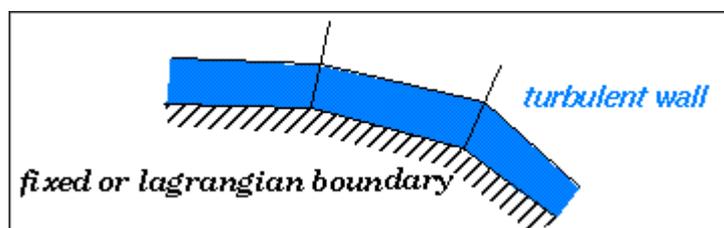


図 405:

系の壁境界の節点境界条件の宣言を行わない場合、不確定と発散を引き起こす可能性があります。 $k-\epsilon$ モデルの使用は、問題に少なくとも1つの乱流壁がなければならないことを意味しています。

壁要素サイズ

通常、 γ_2 の値は限界として考慮され、管路に対して γ_2 の値で最大でも3000でよい結果が得られます。現実的な値としては、100から1000の間が良いでしょう。

ここで、

$$y_2^+ = (u^* y_2) / \nu \quad (300)$$

ここで、

u^*	摩擦速度
y_2	壁に垂直な要素サイズ
ν	層流の運動学的速度

Radiossでは、 y_2^+ は下記とも等しくなります：

$$y_2^+ = 4.77 \left(\frac{\nu_t}{\nu} \right) \quad (301)$$

ここで、 ν_t は乱流の運動学的粘性です。

一般的に、メッシュは y_2^+ の値のある種のトレードオフでの適当なレベルで構築されます。値が高すぎる場合、これは境界層がうまく組み込まれていないことを意味します。境界層が離れる開いたケースでは、物体の後ろのメッシュサイズは主に渦のサイズによって支配されます。このケースでは、精度は壁要素のサイズには支配されず、アルゴリズムの質に支配されると考えられます。

節点境界条件

デフォルトでは、運動条件は材料の速度と加速度に作用します。Radiossでは、このような多様な拘束を定義できます。マルチフィジクスと流体の分野におけるオプションは：

- 滑りありと滑りなしの境界条件
- 強制速度（流入における強制流束）
- 剛結（リスタートの間での臨時の付加）
- 剛な構造をモデル化する剛体と結合と更に抗力と揚力の計算（剛体上の流体の力積を時刻歴データベースに保存）。

グリッド拘束はグリッド速度に対してのみ作用します。以下のいずれかを指定します。

- 滑りなしと完全滑りのグリッド条件
- Lagrange条件、グリッドと材料の速度は同じセット
- 節点の通常の分布を維持するALE リンク
- 強制グリッド速度（移動する流入と流出）

/BCSを使用して節点が固定されている場合、グリッドと材料が固定されていることを意味します。/ALE/BCSを使用する場合は、異なります。最初の3つのコードはグリッド自由度を定義し、2番目の3つのコードは節点に対応する方向でLagrangianのように動作するかどうかを定義します。

Radioss ALE/CFDでは、上のオプションのどのような組み合わせでも指定できます。一方、さまざまな対流と拡散方程式のクロージャについては、慎重に検証される必要があります。

一般的に次のタイプの基本境界条件が用いられます：

- 流入：

流束が強制速度/*IMPVEL*を用いて課されます。密度、エネルギー、乱流エネルギー（即ち、*k*）は一定とします。連続条件が圧力（表示目的のみ）とイプシロンに対して課されます。乱流エネルギー、*rho k*は外部流れに対しては0に、内部流れに対しては $1.5 \cdot \rho \cdot (0.06 V_{in})^2$ に設定します。
- 流出：

圧力を除いた全ての変数に対する連続条件が課されます。サイレント境界（NRF）オプションが用いられた時は、ユーザーが音速の値と代表的な緩和の長さを与え、これは興味のある最大波長よりも大きい必要があります。
- 側面：

サイレント境界（NRF）オプションまたは境界要素無しの滑り条件による全ての変数の連続条件。これは圧力場と速度場に対する自由な場のインピーダンスを保証します。

要素が境界に存在しない場合連続性が仮定されますが、流束を許さないために運動条件は必要です。そうでないと対流方程式が完結せず、プログラムは発散する可能性があります。

計算領域の境界で基本変数を指定する場合。

- 材料LAW11では以下のオプションが使用されます：
 - *Ityp* = 0は、理想気体の停滞条件を指定します（ベルヌーイ流入）。
 - *Ityp* = 1は、線形圧縮性材料の停滞条件を指定します（ベルヌーイ流入）。
 - *Ityp* = 2は、値を課します（流入/流出）。
 - *Ityp* = 3は、サイレント境界用です（流出）。
- 材料LAW51では以下のオプションが使用されます：
 - *Iform* = 2を使用すると、グローバル材料状態を計算するためにも使用される副材料状態（密度、エネルギー、および体積比率）を適用できます。（流入）。
 - *Iform* = 4は、多相材料ALE則の気体流入条件を指定します（気体流入の停滞）。
 - *Iform* = 5は、多相材料ALE則の液体流入条件を指定します（液体流入の停滞）。
 - *Iform* = 6 この境界材料は、多相材料則/MAT/LAW51（NRF流出）についてサイレント流出境界のシミュレーションを可能にします。

たとえば、入力デッキでは、密度とエネルギーが流入口で一定値として課されます。流出口でサイレント境界が課されます。その後、流束が、流入口で節点における強制速度によって注入されます。

サイレント境界（NRF）

LAW11の*Ityp*=3およびLAW51の*Iform*=6は、領域の境界における外向きの波反射を防ぐために使用されます。

次の2つの可能性があります：

- 関数を介して平均圧力が課せられます。平均圧力が課せられた値に収束するように、緩和項が追加されます。これは流出に最適です。
- 平均圧力は近傍の要素の圧力から計算され、圧力は常に変化するこの値に向かって収束します。

境界のインピーダンスは、厳密には、境界から $2l_c C$ の距離で放射するモノポールの波動インピーダンスです。ここで、 $l_c C$ はこの材料則に対する入力データで指定されたものです。

このサイレント境界（NRF）は、速度が課されている場合、または節点が固定されている場合は効果がありません。

衝撃波に対する人工減衰

2次体積粘性 q_a と線形体積粘性 q_b はデフォルトで、衝撃波を含む流体力学や高速衝突に関連する値に設定されます。

流体力学や音響ではこれらの係数は必要なく、ほとんどの場合、一般的にデフォルト値を書き換えて非常に小さい値が設定されます。

運動学的拘束

2種類の運動学的条件が利用可能です：

- 材料速度に適用される条件
- グリッド速度に作用する条件(ALE)

デフォルトでは、全ての運動条件はグリッドではなく材料に作用します。ALEへのにおける対象オプションは：

- 滑りありと滑りなしの境界条件
- 強制速度(流入における強制流束など)
- 剛結(リスタートの間での臨時の付加)
- 剛な構造をモデル化する剛体と結合と更に抗力と揚力の計算(すなわち、剛体上の流体の力積を時刻歴データベースに保存)。

境界条件

ALE 境界条件は入力ファイルに/ALE/BCS キーワードを用いることによりアクティブ化されます。グリッド拘束はグリッド速度に対してのみ作用します。グリッド速度に対して境界条件が指定されない場合、節点は任意の方法に移動します(ALE)。

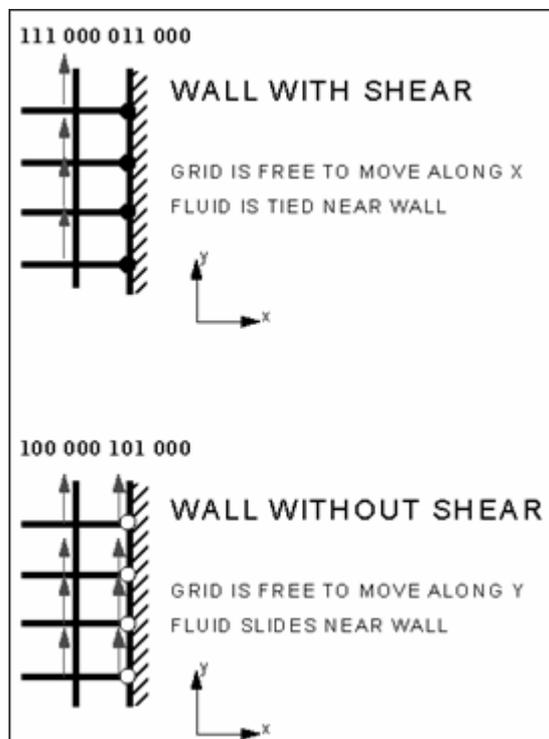


図 408: ALE境界条件の適用

剛体 (/RBODY)

剛体はメイン節点Mとセカンダリ節点群によって定義されます。CFD分野で用いられる剛体では、構造の反力計算に用いられます。

ALEリンク (VEL/ALE)

ALEリンクは2つのメイン節点 M1とM2でコントロールされたグリッド速度を持つn個の節点のセットです。入力データはそれぞれのリスタートで(臨時の付加が)なされます。3つのオプションがあります:

- 入力順に線形補間された速度
- メイン節点の最大速度絶対値に速度をセット
- メイン節点の最小速度絶対値に速度をセット

インターフェース

Radiossで利用可能な接触アルゴリズムを表 24に示します。

表 24: Radiossインターフェース フェイス-フェイス

タイプ	内容	適用分野	接触の取り扱い
1 & 9	スライディングでのALE / LAG	流体 / 構造 連成相互作用	メイン-セカンダリ
2	タイドインターフェース	メッシュ密度の変更(ソリッド)	メイン-セカンダリ、またはLM
3 & 5	2つのパート間の接触 / 衝撃	タイプ7の使用を推奨します。	ペナルティ
6	2つの剛体間の衝撃 / 接触	ユーザー定義の接触	ペナルティ
7	2つのパート間の汎用接触 / 衝撃	全ての速度でのソリッドの接触 / 衝撃	ペナルティまたはLagrange乗数
8	ドロ-ビード接触	スタンピング用途	ペナルティ
10	タイプ7と同様、しかしタイド接触	特別な目的のインターフェース	ペナルティ
11	2つのラインの衝撃	ビーム、バー、またはスプリング	ペナルティ
12	流体 / 流体接触	流体と流体の接触	ペナルティ
16 & 17	節点と2次ソリッドとソリッド-シェルの間または2次曲面間の接触	8節点か16節点厚肉シェル、または20節点ソリッド	Lagrange乗数

タイプ	内容	適用分野	接触の取り扱い
18	CEL Lagrange / Eulerインターフェース	流体-構造連成相互作用	ペナルティ
22	Lagrangianサーフェスと流体領域	流体-構造連成相互作用	ペナルティ

Radioss ALE/CFD専用のインターフェースは:

- TYPE1: ALEパートのLagrangeパートへの接触
- TYPE12: ALE/Eulerでソリッドの移動または固定メッシュへの接触
- TYPE18とTYPE22: 流体-構造連成相互作用の取り扱い

流体 / 流体インターフェース

インターフェースTYPE12は一致しない2つのメッシュの結合のために設計されています。使用はメイン / セカンダリアプローチに制限され、1つのセカンダリセグメントに対し複数のメイン節点を結合することはできません。

 注: 鋭角な角度が存在する場合、メイン / セカンダリアルゴリズムは正しく機能しない点に注意してください。この場合は、そのインターフェースを複数のインターフェースに分割する必要があります。

与えられたセカンダリ節点に最も近いメイン節点が、セカンダリ節点の正面のセグメントに属していない時、エラーが検出されるかもしれません。このような場合、メッシュを局所的に調整してあいまいな状況を避けるようにします。

インターフェースは準-圧縮性と圧縮性オプションで利用可能です。

流体 / 流体インターフェース(タイプ12)でのメイン側とセカンダリ側の選択

ルール1:

各セカンダリ節点はメインセグメントを必要とします。

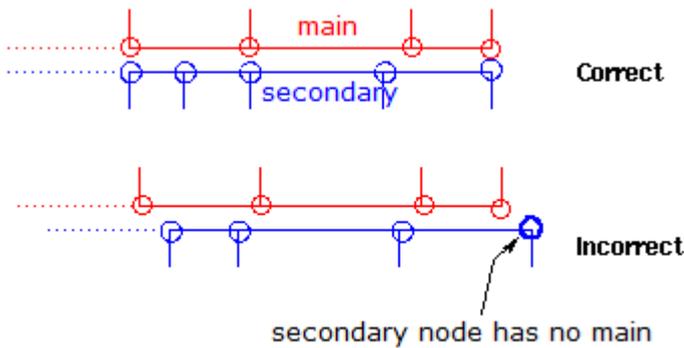


図 409:

これはインターフェースが移動する場合にもあてはまります。

セカンダリ節点のメインサーフェスへの投影が無くなった場合でも、アルゴリズムはワーニングを出力しますが、実行は継続されます。これはセカンダリ節点が最も近いメインセグメントに関連づけられるためです。

ルール2:

全てのメイン節点は少なくとも1つのセカンダリ節点からの寄与を受ける必要があります。

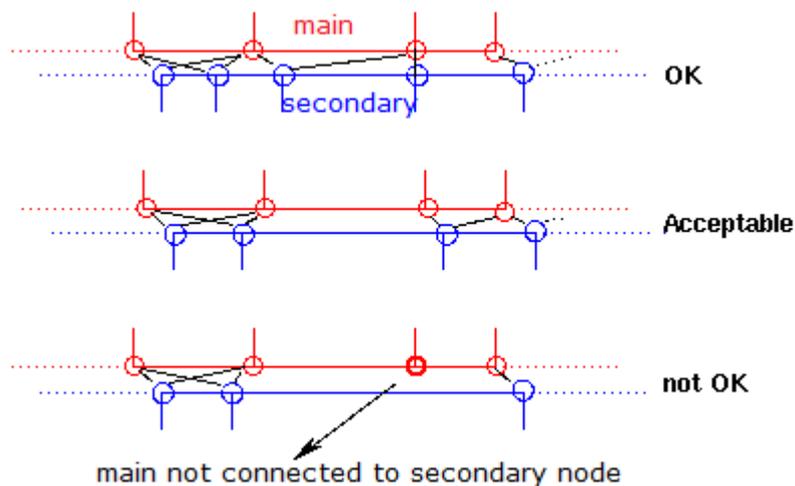


図 410:

メインセグメントがセカンダリを持たない場合でも隣接部分が持っている場合には、上の条件が満足されるためアルゴリズムは機能します。原理的には、いずれにせよ、メインセグメントが少なくとも1つのセカンダリ節点を持つようにすることが推奨されます。

別の言い方をすると、セカンダリのグリッドはメインと同等、またはそれより細かくなければなりません。

ルール3:

圧縮性の場合には、どのようなセグメント(メインまたはセカンダリ)も、1つのALEソリッド要素の1つの面でなければなりません。

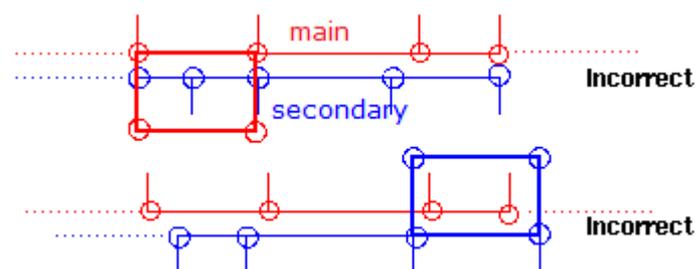


図 411:

ルール4:

セカンダリ側に対する運動条件は、メイン側にも同じ条件で一貫している場合にのみ許されます。

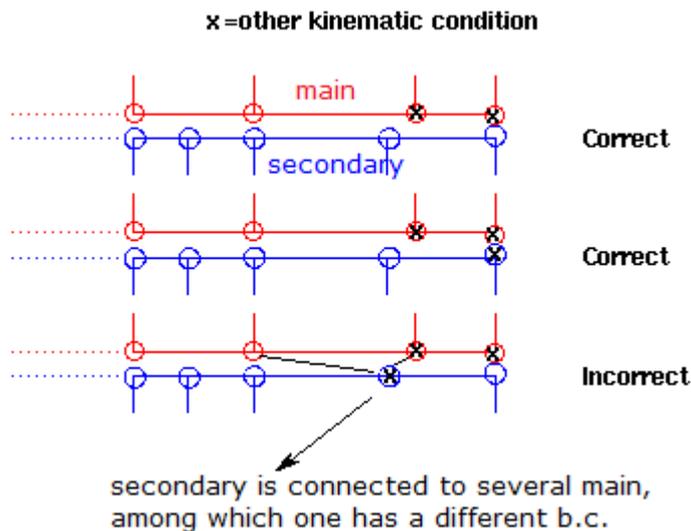


図 412:

これはインターフェースがスライドする場合にもあてはまります。

流体 / 構造連成相互作用 (ALE/Lagrangeインターフェース)

3種類のインターフェースが利用可能です:

インターフェースTYPE1

インターフェースTYPE1はALEとLagrange領域の境界の定義に用いられます。2つの領域の境界では、完全スライディング壁のように完全すべり条件が与えられます。LagrangeとALE節点の法線方向材料速度が等しくセットされます。

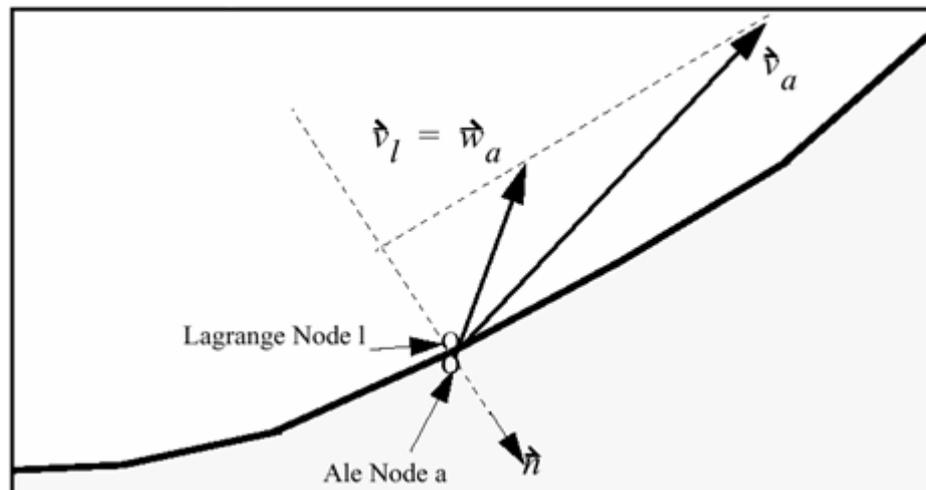


図 413: インターフェースタイプ1での流体-構造連成相互作用

インターフェースTYPE9

これは、ボイド開口および自由表面を持つ(つまり、メイン側とセカンダリ側が接触していない場合、両者の間に相互作用はない)ALE/Lagrangeインターフェースです。ALEパートがセカンダリとして定義され、Lagrangeパートがメインとして定義されます。グリッド速度は、法線方向の材料速度と同じです。

インターフェースTYPE18(CEL)

インターフェースTYPE18はEuler/ALE節点とLagrangeメインサーフェスとの間の接触を生成します。メインサーフェスの接線方向の材料(流体)速度を適用するため、粘弾性ペナルティ法が用いられます。グリッド速度はこのインターフェースでは修正されません。このインターフェースは、例えば船が侵入するような場合の Lagrangeパート(構造)がEuler/ALEメッシュ内部への貫入のシミュレーションを可能にします。

このインターフェースを用いたシミュレーションの質は、インターフェースのパラメータ、特にインターフェース剛性に強く依存します。

流体構造連成相互作用問題のためのインターフェースで推奨する剛性係数は次のようにして得られます：

$$Stfac = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot S_{el}}{Gap} \tag{302}$$

ここで、

- ρ (最も高い) 流体密度
- v 現象の速度(音速、または超音速現象ではそれ以上)
- S_{el} Lagrangian要素のサーフェス

空気力学の問題では、その推奨は：

- $Gap = 1.5L_c$ ここで、 L_c は流体要素の長さ

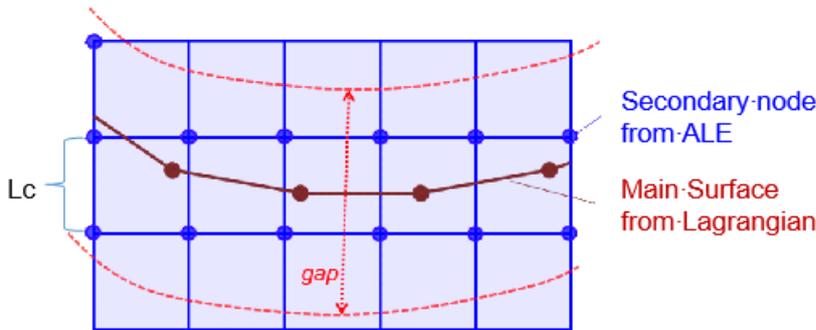


図 414:

- 右記の一定剛性; $K = g \cdot P \cdot L_c$
- インターフェース剛性に関連する粘性:

$$v_s = 2\alpha \cdot Gap^2 \cdot \sqrt{\gamma P \rho} \tag{303}$$

ここで $\alpha = 0.5$ または $\alpha = \gamma$

P および ρ は空気の特徴

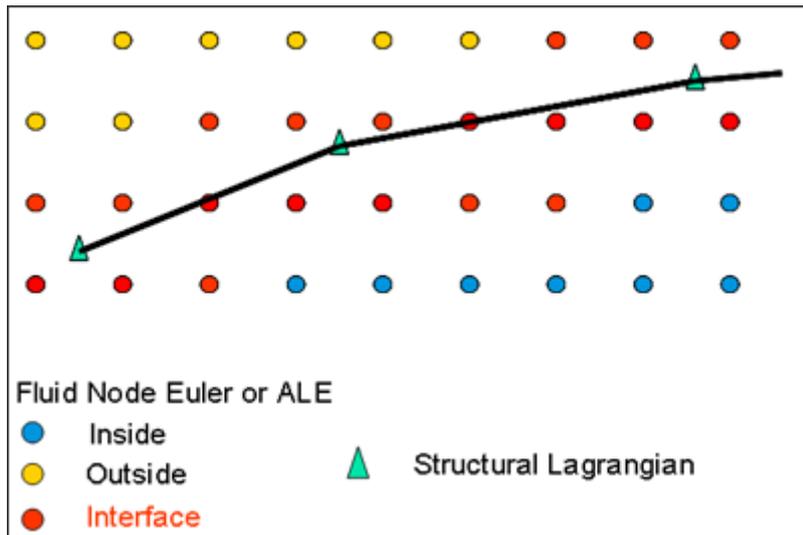


図 415: インターフェースTYPE 18での流体-構造連成相互作用

推奨するギャップの値は要素サイズの1.5倍です。

 注: 適切な結果を得るためにインターフェースには十分に細かいメッシュを必要とします。

単位系

Radiossは、ユーザーが一貫した系でデータを与えることができるように、単位系を内蔵しています。

一貫性を検証するには、 $\text{圧力} = \text{密度} \times \text{長さ}^2 / \text{時間}^2$ であることを確認します。

最も代表的な単位系(鋼材の例):

長さ	時間	応力	質量	力	エネルギー	密度	ヤング率	重力	降伏応力
m	s	Pa	kg	N	J	7.8e+03	2.1e+11	9.81e+00	2.06e+05
mm	ms	MPa	g	N	mJ	7.8e-03	2.1e+05	9.81e-03	2.06e+02
mm	ms	GPa	kg	KN	J	7.8e-06	2.1e+02	9.81e-03	2.06e-01
mm	s	MPa	Mg (ton)	N	mJ	7.8e-09	2.1e+05	9.81e+03	2.06e+02
cm	micros	Mbar	g	10 ⁷ N	10 ⁵ J	7.8e+00	2.1e+00	9.81e-10	2.06e-06

See Also

[/UNIT \(Starter\)](#)

Engine入力

Radioss CFDで用いることができるEngineファイルオプションを、例として以下に示します。

時間ステップコントロールのためのオプションコマンドの定義

```
/DT/BRICK/STOP
1. 1.E-6
/DT/SHELL/CST
0.9 1.E-5
```

時刻歴ファイルの出力選択を定める定義コマンド

```
/TFILE Output interval
1.e-4
```

Engine出力ファイル

```
/PRINT/100 Cycle interval for output
```

アニメーション

```
/ANIM/DT time settings
0.09 0.000833 time for first animation file, interval
```

要素変数の選択

```
/ANIM/ELEM/K Turbulent energy
/ANIM/ELEM/TVIS Turbulent viscosity
/ANIM/ELEM/P Pressure
```

節点ベクトル選択

```
/ANIM/VECT/VEL velocity
/ANIM/VECT/DISP displacement
```

フィルタリングされたサンプル出力

```
/@TFILE
0. 1.E-4 Start time, interval nodes
2009 2010 2011 2012 2017 2018 2023 2024 2029 2030
2035 2036 2041 2042 2047 2048 2053 2054 2059 2060
2065 2066 2071 2072 2077 2078 2153 2154 2157 2158
2161 2162 2165 2166 2169 2170 2173 2174 2177 2178
.....#
```

トラブルシューティング

問題となる典型的なケース:

- 浮動小数点例外エラーで停止
- 時間ステップが速く落ち込む

多くの問題ケースにおける原因:

- 発散
- アワグラス励起

- 適合しない境界条件

運動エネルギー、乱流エネルギー、回転エネルギー、アワグラスエネルギー、材料の変数等の時刻歴のカーブを見て、予期しない挙動が観察された時刻を特定するように努めます。

Starterがクリーンなメッセージで通過しなかった場合には出力ファイルを開き、問題のより詳細な説明を定義している "ERROR" の語を探します。

Starterがクラッシュした場合には、Starter出力 (Rootname_0000.out) ファイルを開き、最後の部分を表示します。データを再確認し、それが意味のあるものかどうかを見ます (意味のない可能性が高いでしょう)。次に、意味のあるデータを見つけるまで前に戻ります。入力データ内で、意味のある部分とそうでない部分が切り替わる周辺の内容を調べます。カードが多すぎたり不足している場合があるかもしれません。

 注: 入力デッキの変更は、必要に応じてコントロールカードに反映させる必要があります。

Engineが負の密度または時間ステップの問題で停止したり、あるいはクラッシュした場合:

- 最後のリスタートファイルと"発散するすぐ前"のリスタートに戻ります。
- Engineファイルに次のオプションを指定して新たなリスタートを実行し、発散するまでの内容を確認します:

```
/PRINT/-1
/ANIM/DT
Ti 1.E-30 (where, Ti is the initial time of this run + epsilon)
/TFILE/
1.E-30
```

これでリスト、アニメーションファイル、および時刻歴に全てのサイクルの結果を持つことができます。これらを用いて問題を調査します。多くのケースにおいて、アニメーションの速度場にある不規則さを見ることができます。これは、境界条件の不備と結びつけることができます。

発散

発散はある変数が大きくなりすぎることを意味します。これは問題がうまく定義されていない (数学的) 場合または時間ステップが理論的な限界時間ステップよりも大きい (数值的) 場合などに起こることがあります。

時刻歴およびアニメーションプログラムを実行させることによって時間と空間での問題の局所化を試みます。変則的な速度、乱流エネルギー、および粘性を探します。

境界をチェック:

- 運動学的拘束
- 要素境界 (材料TYPE11)

流体力学の古典的仮定を検証します。

メッシュの漏れを探します (一致していない節点、平面でない対称、境界条件の不足)。乱流モデルを用いている場合は、少なくとも1つの乱流壁があることを検証します。

アワグラス速度のパターンを探します。これは、集中流束がある場合、要素のアスペクト比が悪い場合、またはアワグラス係数に非常に小さな値を設定している場合 (材料パラメータ参照) に起こり得ます。

板厚が要素サイズよりも厚い要素が存在しないことをチェックして確認します。弾性安定はコードで先に仮定され (計算されませんが)、これは板厚がシェル長さを超えないという条件に基づく仮定となります。

粒子法流体力学 (SPH)

粒子法流体力学の手法の定式化は粒子がメッシュの格子から自由である時の力学の方程式を解くのに用いられます。

これは特に極端に大きい変形の現象をシミュレートするのに適しています。即ち、ALEとLagrange定式化の有限要素法ではその効率と精度を失うような範囲への適用です。

Radiossコードに組み込まれているこのSPH法は、大部分の関数と適合性があります。例えば、片方が有限要素、他方が粒子によって離散化されている2つの物体を相互作用させること等が可能です。

SPHとALEの境界がラグランジアンの場合にのみ、ALEモデルにSPH定式化を導入できます。SPH定式化は、3D解析でのみ使用できます。

See Also

[RD-E:1300 ショックチューブ](#)

[RD-E:2200 着水](#)

[RD-E:4900 ウィンドシールドへのバードストライク](#)

[RD-E:5500 ファンブレードの回転の初期設定と衝突](#)

[SPH Cell Distribution \(Theory Manual\)](#)

SPHセルの分布

粒子は6方最密充填、面心立方または立方ネットのパッキングで作成される必要があります。

6方最密充填および面心立方は、Radiossでの使用に推奨され、同様の結果を与えます。面心立方の粒子分布は、HyperMesh SPHパネルを使って作成できます。6方最密充填ネットを作成するためのHyperMesh Tclマクロは、Altair Connectウェブサイトから入手が可能です。

6方最密充填ネット

ある面心立方ネットは6方最密充填分布を表し、これはネットを構築するのに有用です。

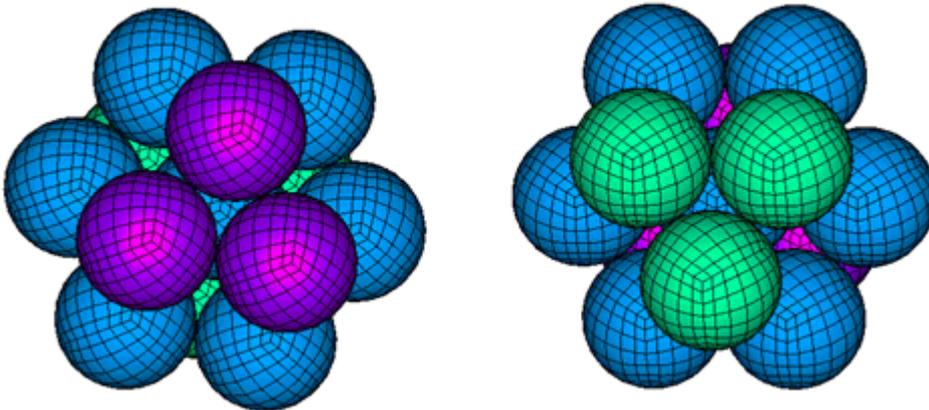


図 416: 6方最密充填ネットの局所ビュー

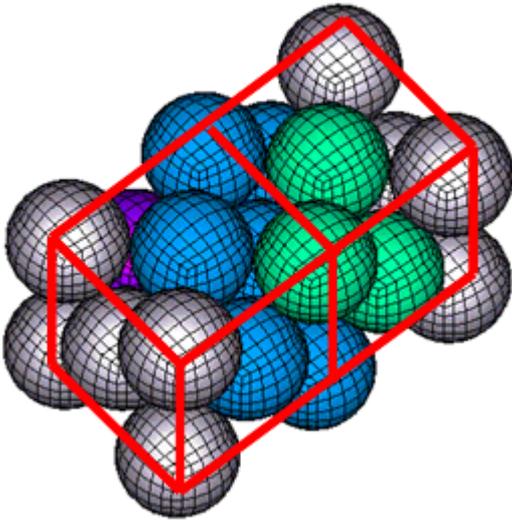


図 417: 面心立方ネットの透視ビュー

6方最密充填ネットの分布は、Hexagonal Compact Net Tclスクリプト用にAltair Connectで検索すると入手できるTclスクリプトを使ってHyperMeshで作成することができます。このスクリプトを使用する際は、任意の粒子とその近傍の最も近い粒子との間のピッチまたは距離が h_0 として入力されます。

粒子 m_p の質量は、プロパティ/PROP/SPHで定義されます。

SPH粒子質量は、材料密度 ρ と6方最密充填ネットのピッチ h_0 に関連します。この粒子質量は、次のように計算することができます:

$$m_p \approx \frac{h_0^3}{\sqrt{2}} \rho \tag{304}$$

空間はそれぞれの粒子を取り巻く多面体に分割できるため、それぞれの体積は:

$$V_p = \frac{h_0^3}{\sqrt{2}} \tag{305}$$

体積内の離散化の差により、質量は以下によってより正確になり得ます:

$$m_p = \frac{\rho V}{n} \tag{306}$$

ここで、

V
 粒子によって満たされる全体積

n
 体積内に分布される粒子の全数

6方最密充填ネットの場合、/PROP/SPH内の推奨されるスムージング長 h は、粒子間の最短距離であるピッチ h_0 となります。これより小さいスムージング長は、引張の物理的問題材料がない際のみ使用できます。材料が引張の挙動を有さない場合、 h_0 より大きなスムージング長は安定性を増すために使用されますが、計算コストは高くなります。

以下の一覧は、/PROP/SPHで異なるスムージング長 h が使用されている際に、近傍の粒子の数を示します。シミュレーションの精度と計算コストは、スムージング長が大きくなるにつれて向上します。

表 25: 6方最密充填ネット内の隣接粒子の数

距離 d	距離 d の粒子の数	距離 d 内の粒子の数
h_0	12	12
$\sqrt{2} h_0$	6	18
$\sqrt{3} h_0$	24	42
$2h_0$	12	54
$\sqrt{5} h_0$	24	78

面心立方

面心立方は、14のグループ内の粒子をアレンジし、コーナーと立方体の各面の中央を生成します。

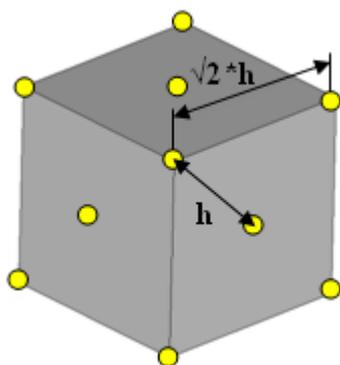


図 418:

6方最密充填ネットと同様、各粒子は12個の隣接粒子を有し、粒子の質量は:

$$m_p = \frac{\rho V}{n} \quad (307)$$

面心立方の場合、/PROP/SPHで推奨されるスムージング長 h は、sphメッシュがHyperMeshで作成された際に入力されたピッチです。ピッチ h_0 は、粒子間で一番短い距離です。 h_0 より小さいスムージング長は、引張の物理的問題材料がない際にのみ使用できます。材料が引張の挙動を有さない場合、 h_0 より大きなスムージング長は安定性を増すために使用されますが、計算コストは高くなります。

シンプルな立方ネット

c をネット内のそれぞれの基本的な立方の側部の長さとしします。

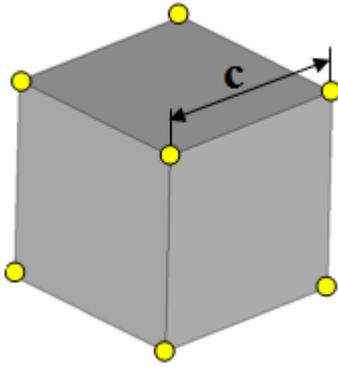


図 419:

粒子の質量 m_p は、材料の密度 ρ とネットのサイズ c に、次の式を用いて関連付けられるべきです:

$$m_p = c^3 \rho \quad (308)$$

表 26: 立方ネットの隣接粒子の数

距離 d	距離 d の粒子の数	距離 d 内の粒子の数
c	6	6
$\sqrt{2}c$	12	18
$\sqrt{3}c$	8	26
$2c$	6	32
$\sqrt{5}c$	24	56
$\sqrt{6}c$	24	80
$\sqrt{2}c$	12	92
$3c$	6	98

立方ネットを用いた経験から、引張の不安定の問題を解決するには、面心立方または6方最密充填ネットよりも大きいスムージング長が必要です。スムージング長が大きいほど、計算コストは高くなります。これは、より多くの近傍粒子が、各粒子についての計算に含まれなければならないせいです。

立方ネットの場合、/PROP/SPHでスムージング長 h が $1.25c$ から $1.5c$ までの間にあることが推奨されます。

保存される隣接要素の最大数

N_{neigh} 個以上の隣接粒子がセキュリティ距離内に見つかった時、プログラムは N_{neigh} 個の最も近いポイントだけを保持し、 α_{sort} の値を減少させます。

これが行われても、全ての粒子の影響球の内側にある全ての真の隣接粒子はなお保持され、そのため結果は変化しません。

他のケースでは、"Warning SPH Computation" といったメッセージがRadioss出力ファイルに送られます。このようなメッセージがあるケースでは、サイクルごとに最も近い粒子を並べ直す必要が生ずるため、計算時間が増加する点にご留意ください。いずれにしても、この種の状況はしばしば(局所的な)不安定の証拠となることがあるため、注意深く分析する必要があります。

SPH対称条件

複数のSPH対称条件

軸対称条件は、対称軸で交差する2つの平面に関する条件の使用を通してモデル化することができます。球対称条件は、対称の中心で交差する3つの平面に関する条件の使用を通してモデル化することができます。

しかし、これらの種類の対称は同じように扱われるわけではありません。

例えば、軸対称条件のケースでは、全てのゴースト粒子が対称軸の周りに作られるわけではありません。2つの対称面に関する実際の粒子の対称粒子のみが作られます。

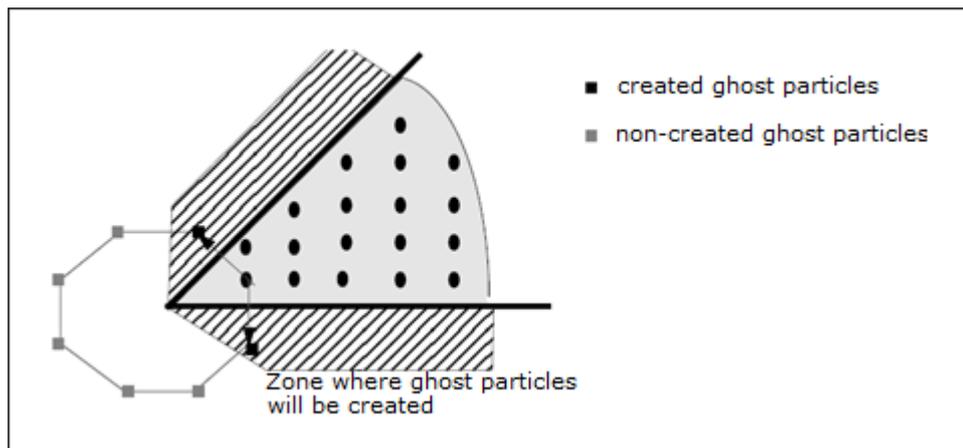


図 420: 完全ではない複数の対称

したがって、軸対称(球対称の場合も同様)条件におけるいくつかの特性は、軸対称(球対称の場合も同様)に近づきます。

対称軸(多少の中心の場合も同様)の近くで、対正面(P)上にある節点は、隣接粒子が平面(P)に関して対象でないため、(P)の法線方向に0でない速度を持つことができます。

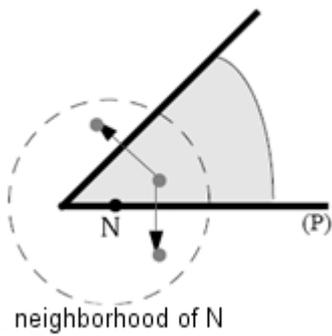


図 421: 粒子Nの隣接粒子は平面(P)に関して対称ではなく、Nの平面(P)に関する法線方向速度も0ではない

運動学的境界条件

上記の解説に関して、運動学的境界条件を明示的な方法で付加することによりそれを強化することができます。

運動学的境界条件は /SPHBCS オプション内で指定された節点グループに属する節点に対して、以下のように追加されます:

- "Slide"タイプの場合、節点の方向"Dir"の速度が0になります。
- "Tied"タイプの場合、節点の全ての方向の速度が0になります。

複数の運動学的境界条件が同じ節点に異なるSPH対称条件を通して与えられた場合、その運動学的境界条件は、それらが直交しない方向に与えられている場合でも、自動的に計算されます。

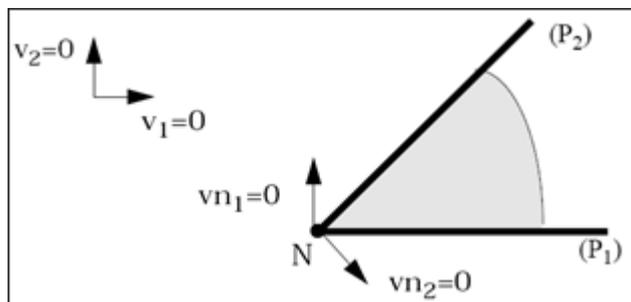


図 422: 異なるSPH対称条件からの運動学的境界条件の組み合わせ

図 422 上の図はNに2つの運動学的境界条件が平面(P₁1)と(P₂2)に関する2つの対称条件を通して与えられた場合で、2つの境界条件は、(P₁1)と(P₂2)の共通の軸の直交する平面内の速度が0のままになるように修正されます。2つの対称条件の1つがタイプ"Tied"条件の場合には、Nの全ての方向の速度が0になる点に注意が必要です。

同じ節点に SPH対称条件を通した運動学的境界条件(オプション/SPHBCS)と通常境界条件(オプション/BCS)を同時に与えることも、通常境界条件が移動スキューではなく、固定スキューまたは全体スキューで与えられている限り可能です。2つの条件はその時同じ方法で構成されます。

パート質量

粒子が時刻t=0において、対称面上にある場合、粒子の質量と初期体積はそれぞれ考慮される点に注意が必要です:

$$m = \frac{m_p}{2}, \quad V = \frac{m_p}{2\rho} \quad (309)$$

ここで、 m_p はプロパティセット内に指定される質量です。

粒子が n 対称平面内に時刻 $t=0$ である際

$$m = \frac{m_p}{n}, \quad V = \frac{m_p}{n\rho} \quad (310)$$

(この粒子から作られるゴースト粒子が同じ初期体積と質量を得ます)。

$n > 2$ の際、前の式は質量の誤差をもたらす可能性があり、その粒子が属するパートが物理モデルに関してエネルギーで出力されます。

定式化レベル

対称平面が定義された際、対称面上の全ての粒子に対して運動条件が設定された場合でも、時刻0で領域内部にある粒子が対称面を横切るとは理論的に可能です。

これは粒子が壊れた際に粒子間の剛性が無限大の値には増加しないSPH 独特のもので、そのため、粒子が対称面上にある場合にはその上に置かれますが、それが領域内にある場合には対称面を通り抜けることが起こります。

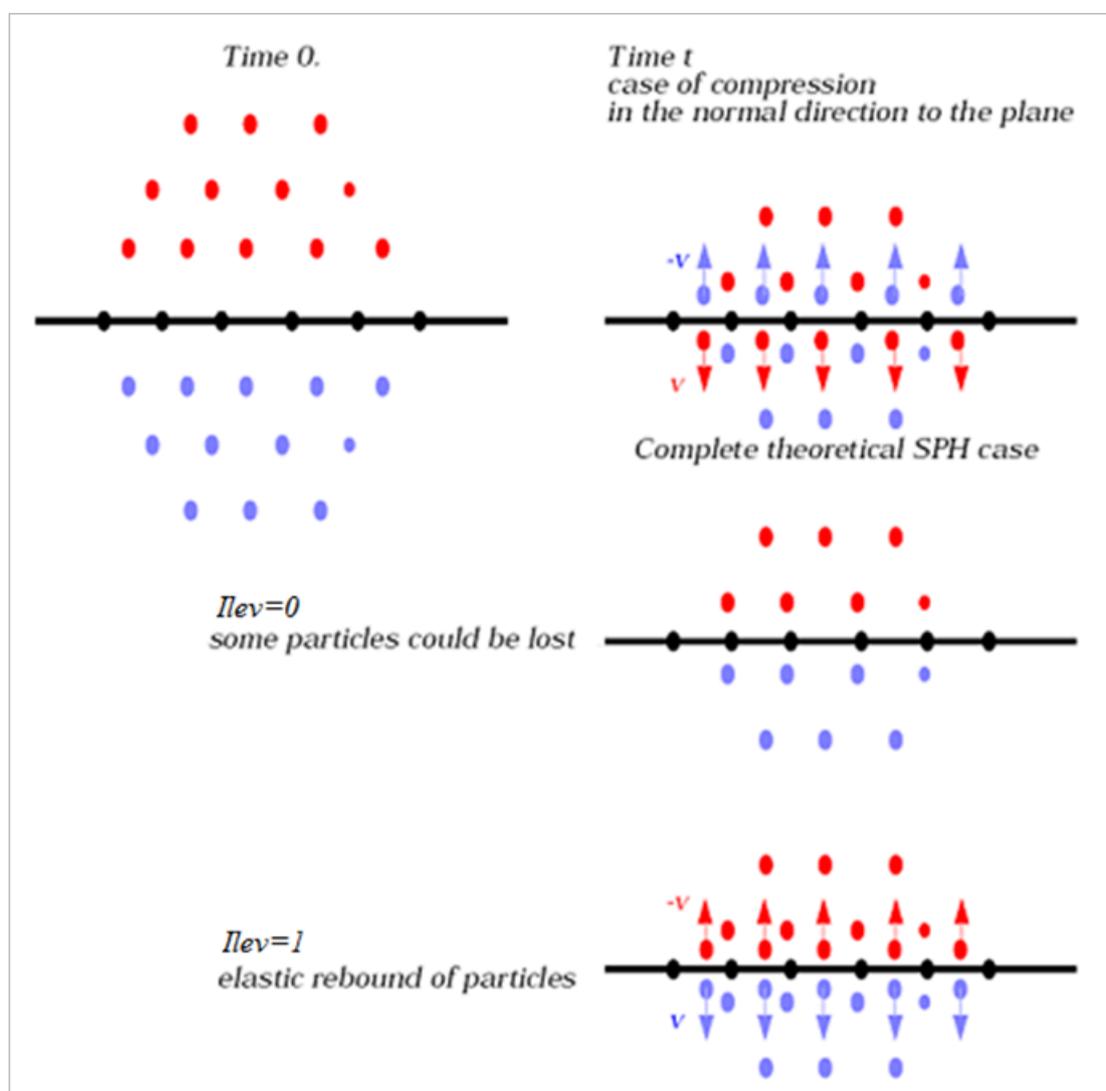


図 423: 定式化レベル

$Ilev=0$ の場合、対称面を交差する粒子は(次第に)計算からは考慮されなくなり、その時領域内にある対称粒子に関しても計算されません。

$Ilev=1$ の場合、対称面を交差した粒子は対称面上で弾性を持ってリバウンドします。面の法線方向のそれらの速度は逆に設定されます。

注: $Ilev=1$ に設定する際には、計算時間の理由から、時刻0で対称面上にある全ての粒子に対する運動条件と共に用いられることが強く推奨されます。

生成される最大ゴースト粒子数

ゴースト粒子はセキュリティ距離内隣接粒子を探索する毎に生成され、新しい探索の際に破壊されます(新しいゴースト粒子のセットが次に生成されます)。

どの探索時においても、任意の実際の粒子のセキュリティ距離内にある全てのゴーストが生成されます。

実際には、厳密に必要な追加の粒子が更に作成されます: i の j 隣接の場合には、対称面 P に関して粒子 N_{ij} に対する対称粒子 G_{ij} が作成されます:

$$d(N_{ij}(P))^2 \leq (1 + \alpha_{sort}) \cdot \max(d_i + d_j)^2$$

ここで、 d_i と d_j は、 i と j に関連したスムージング長さです。

対称平面を横切る実際の粒子がない限り(全ての実際の粒子が対称平面の同じ側にある)、この基準は全ての実際の粒子に対する全てのゴースト粒子をセキュリティ距離内に得るのに以下の理由で十分です:

$$d(N_{ij}(P)) \leq d(G_{ij}, N_{ij}) \text{ 右記の場合; } \forall (i, j)$$

$$\text{また、} d(G_{ij}, N_{ij}) \leq \sqrt{1 + \alpha_{sort}} \cdot \max(d_i + d_j)$$

$$\Rightarrow d(N_{ij}(P)) \leq \sqrt{1 + \alpha_{sort}} \cdot \max(d_i + d_j)$$

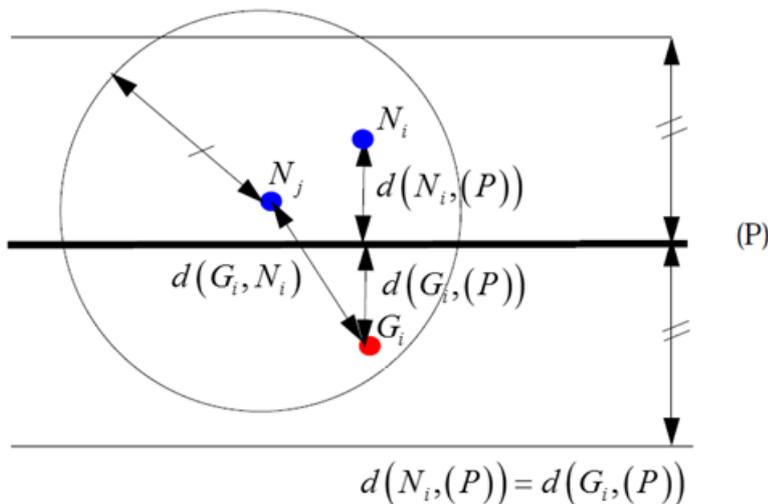


図 424: 生成されるゴースト粒子

従って、シミュレーション全体を通して対称面から離れたままでいると思われる粒子は対称化されません。このことは、1度に対称化される粒子の数の過剰見積もりにつながります。

粒子 N_{ij} が n 条件に対して対称化されなければならない際、粒子 N_{ij} は n ゴースト粒子の誕生を与えます。以下の量は $Maxsph$ よりも小さいままである必要があります(v14.0.220以降、“ $Maxsph$ ”は無視され、メモリは動的に割り当てられます)。

$$\sum_{n=1}^n n_{particles} \tag{311}$$

ここで、

- n 条件の数
- $n_{particles}$ 右記の条件に関して対称化される粒子の数; n

いずれにしても、デフォルト値は SPH 対称条件の数に粒子の数を掛けたもので、これはどんな問題を扱うのにも十分です。

Solid to SPHオプション(Sol2SPH)

Solid to SPHオプション(Sol2SPH)は、Langrangeの計算における時間ステップ / ロバスト性を向上させるため、物理の変更は伴わずに、ソリッド要素を粒子に変えることを可能にします。

時間ステップ

Radiossでは2つのSPH時間ステップ法が使用できます:

- 粒子時間ステップ (/DT/SPHCEL)
- 節点時間 (/DT/NODA)

粒子時間ステップでは、安定性時間ステップは次のように計算されます:

$$\Delta t = \Delta T_{sca} \cdot \min_i \left(\frac{d_i}{c_i(\alpha_i + \sqrt{\alpha_i^2 + 1})} \right) \tag{312}$$

ここで、

- d_i 右記の粒子に関連したスムージング長さ; i
- c_i 右記の位置における音速; i

$$\alpha_i = q_a + \frac{q_a \cdot \bar{\mu}_i \cdot d_i}{c_i} \tag{313}$$

時間ステップの係数 ΔT_{sca} は、0.3に設定することが推奨されます。

節点時間ステップでは、安定性時間ステップは次のように計算されます:

$$\Delta t = \Delta T_{sca} \cdot \sqrt{\frac{2m}{K^*}} \tag{314}$$

ここで、

- m 粒子の質量
- K^* SPH相互作用に基づく剛性

時間ステップの係数 ΔT_{sca} は、0.67に設定することが推奨されます。

熱解析

熱伝導は、SPH粒子と有限要素との間で使用可能となりました。ここで、/INTER/TYPE7および/INTER/TYPE21では $I_{the}THE=1$; /THERM_STRESS/MATではSPH内の熱膨張も可能です。

Solid to SPHオプション (Sol2SPH)

Solid to SPHオプション (Sol2SPH)は、Langrangeの計算における時間ステップ / ロバスト性を向上させるため、大きな物理的変更は伴わずに、ソリッド要素を粒子に変えることを可能にします。

これは、ソリッドプロパティオプション/PROP/TYPE14 (SOLID)および/PROP/TYPE6 (SOL_ORTH)と互換であり、以下に制限されています:

- $I_{solid}SOLID = 1, 2$ または24
- $I_{frame}FRAME = 1$ または2
- 8節点ソリッド (縮退を含む/BRICK)および4節点四面体 (TETRA4)。ただし、10節点四面体は除く。

入力は:

```
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/PROP/SOLID/3
Prop example
#   Isolid   Ismstr           Icpre   Itetra10   Inpts   Itetra4   Iframe           dn
#         1         2             0       0           0         0           1             0
#           q_a         q_b           h           LAMBDA_V           MU_V
#         0             0             0           0
#   dt_min   istrain       IHKT
#         0             0             0
#   Ndir   SPH_part
#         1         10
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
```

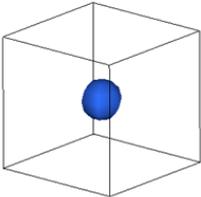
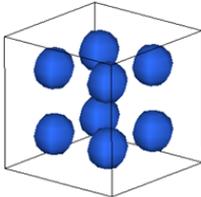
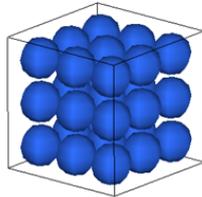
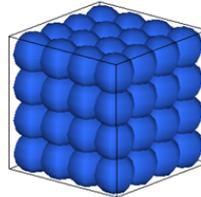
SPH_part

SPHプロパティを定義するパート番号

Ndir

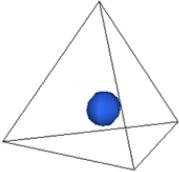
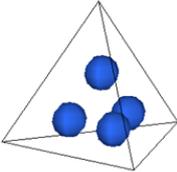
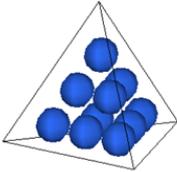
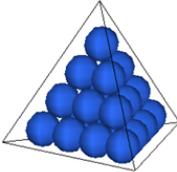
方向ごとに作成された粒子の数で、最大値は9

表 27: 8節点ソリッド

			
Ndir = 1: 1個の粒子が作成されます	Ndir = 2: 8個の粒子が作成されます	Ndir = 3: 27個の粒子が作成されます	Ndir = 4: 64個の粒子が作成されます

粒子は立方ネットに従って作成されます。

表 28: 4節点テトラ

			
$Ndir = 1$: 1個の粒子が作成されます	$Ndir = 2$: 4個の粒子が作成されます	$Ndir = 3$: 10個の粒子が作成されます	$Ndir = 4$: 22個の粒子が作成されます

ソリッド要素からSPH粒子への遷移は、接触またはソリッド削除によって開始できます。

Sol2SPH粒子の挙動

すべての粒子は、計算の開始時に作成されます。

それらのメイン要素が削除されていない限り、それらの粒子は解放されません。

メインソリッド要素が削除されると、粒子は解放され、他の純粋なSPH粒子のような挙動を示します。

解放されていない粒子の運動は、それらのメイン要素から補間されます。それらの粒子に作用する力は、対応するそれらのソリッド節点に伝達されます。

それらの力とは以下のとおりです：

- それらがTYPE7インターフェースまたは剛壁のセカンダリである場合は接触力
- 解放された粒子または純粋な粒子との相互作用力

粒子アクティブ化プロセス

粒子は、次の条件に基づいて完全にアクティブになります。

- それらのメインソリッドが次のいずれかの理由で削除される：
 - 最小時間ステップに到達した(/DT/BRICK/DEL)
 - ソリッド材料則に関連する破断基準を満たした
- 接触の場合：
 - 解放されていない粒子がTYPE7インターフェースのセカンダリであり、メインサーフェスのギャップに入ると、インターフェースの I_{bag} BAGフラグが1に設定されている場合はソリッドが削除され、関連する粒子が解放されます。
 - 解放されていない粒子が別のパートに属する任意の粒子(解放されていない粒子を含む)の相互作用距離の範囲内にある場合は、メインソリッドが削除され、関連する粒子が解放されます。したがって、2つのSol2SPHパートの間に接触インターフェースは必要ありません。

材料則は、/MAT/LAW2、/MAT/LAW3、/MAT/LAW4、/MAT/LAW6、/MAT/LAW12、/MAT/LAW21、/MAT/LAW24、/MAT/LAW36、/MAT/LAW49または/MAT/LAW81となります。

ソリッドとSPHについて両方の材料則を同じ種類にする必要があります。

材料のパラメータは異なる値にできますが、整合性を確保してください。

同じパラメータを維持し、破断値（破断基準、最大ひずみ、スポーリング圧力、。。。）のみを変更することが推奨されます。

Sol2SPHパートと他のパートとの間の接触

Sol2SPHと有限要素パート

接触は、インターフェースTYPE7を使用して定義する必要があります。

Sol2SPHパートはセカンダリである必要があり、メインパートより細かくする必要があります。

接触は、メイン(FE)パートとSol2SPHパート(SPH_PARTIDでインスタンスに定義されているパート番号)のSPH粒子との間で定義する必要があります。

自己接触インターフェースは使用できませんが、粒子はアクティブでない場合でも相互に作用しているため、Sol2SPHパートの自己接触は常に考慮されます。

剛性ファクターおよびギャップ定義は、標準のSPH粒子と同じルールに従います。

インターフェースの I_{bag} BAGフラグが1.0に設定されている場合、SOL2SPH粒子は自動的にアクティブになる可能性があります、それらの対応するソリッド要素はギャップ距離に入ると削除されます。

SOL2SPHとSPHまたはSOL2SPH

接触は自動的に扱われ、インターフェースを作成する必要はありません。

その他のモデリングガイドライン

制限事項

Sol2SPHは、SPHBCSおよび流入 / 流出オプションと互換性はありません。

メッシュサイズおよびその他のSPHパート

すべてのSPHおよびSol2SPHパートで、ピッチが同じである必要があります。

Sol2SPH粒子構成が立体の場合は、SPHパートでも立方ネットを使用する必要があります。

/BRICK/DT/DEL

/DT/BRICK/DELの使用は、SOL2SPHの使用では最もCPU効率が高い方法です。

最小時間ステップは、自然な時間ステップより約20から30%小さくする必要があります。

SPH粒子の安定性を高めるためには、節点時間ステップを使用することを推奨します。

ソリッドの削除後は、時間ステップは次のように小さくなる可能性があります：

$$\Delta t = \frac{\Delta T_{\min}}{N_{dir}} \quad (316)$$

ここで、

ΔT_{\min}	/DT/BRICK/DELで定義されている削除ソリッド時間ステップ
N_{dir}	方向ごとの作成された粒子の数

マルチドメインテクニック

マルチドメインテクニック (RAD2RADとしても参照されます) の目的は、大規模なRadiossモデルの計算パフォーマンスを最適化することです。

マルチドメインテクニック (RAD2RADとしても参照されます) の目的は、大規模なRadiossモデルの計算パフォーマンスをある規準に合うように最適化することです：

- 全体モデルをその間が明確にインターフェース / 結合で定義された個別のサブドメインに分割できること。
- 異なるサブドメインは異なるメッシュサイズで特徴づけられ、その結果、非常に異なる最小時間ステップを持つこと。

目的は、時間ステップサイズが大きく異なるドメインのモデルの予測精度を、妥当な、あるいは好都合な計算時間で、向上させることにあります。

例えば、大きなモデルの1つまたは複数のパートが亀裂の局所化 / 伝播の様な特定の局所的現象を得るために細かくメッシュ分割されている場合の計算に、マルチドメインテクニックを用いるのは訴求力があります。

航空機の不時着水または着陸シミュレーションにおいて見られるような、大きな流体-構造相互作用モデルの計算にマルチドメインテクニックを使用するとさらに有用です。この場合、時間ステップが大きい流体要素は、時間ステップが非常に小さいLagrange構造要素に比べて非常に多くなります。

Radioss衝突ソルバーで用いられている陽的積分スキームでは、モデル全体の時間ステップが、要素の最小時間ステップで規制されます。このモデル全体を物理的に等価なサブドメインに置き換えるという概念は、パートを異なる最小時間ステップで分割します。それぞれのサブドメインは個別のRadiossモデルとしてその時間ステップで解かれ、その間の力や運動量の伝達は、別のメインプログラム (RAD2RAD) で安定性の拘束条件を満足するように計算されます。

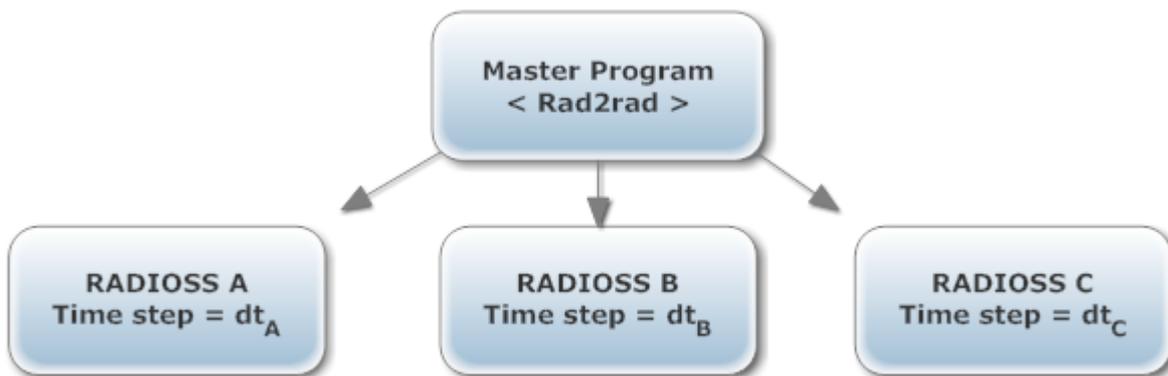


図 427:

マルチドメインの効率は、以下に示す2種類の相違に基づきます：

- 時間ステップのサイズ
- ドメインの相対サイズ

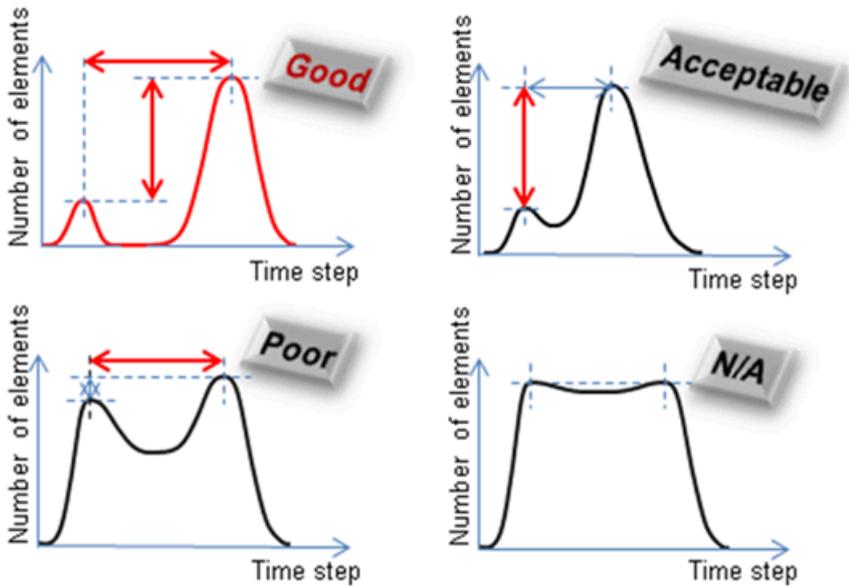


図 428:

特に、次のようなメインドメインおよびサブドメインがあるモデルに適しています:

- メッシュ密度が大きく異なるため、時間ステップが大きく異なる
- ALEまたはSPHDメインがLagrangeドメインより大きい場合に、Lagrange、ALEまたはLagrange、およびSPHなど、定式化がさまざまである

理論的な速度上昇

マルチドメイン法のこの効率は、速度上昇係数によって測定できます。それは、元の計算の経過時間とマルチドメイン法で取得した経過時間との比率です。

メインプログラム (RAD2RAD) のCPUコスト、およびコミュニケーションに費やした時間を無視でき、また、各ドメインのサイクルあたりの時間ステップおよびコストが計算中に一定である場合、マルチドメインの使用が妥当かどうかを判断するために速度上昇の予測を計算できます。

AとBという2つのドメインがあり、Aは時間ステップが最も小さいドメインである場合、速度上昇は、次の式を使用して得られます。

$$Speedup = \frac{T_{MONO}}{T_{MULTI}} = \frac{(Ne_A C_A + Ne_B C_B) Nc_A}{Ne_A C_A Nc_A + Ne_B C_B Nc_B} \quad (317)$$

ここで、

Nc	ドメイン毎のサイクルの数
Ne	ドメイン毎の要素の数
C	各ドメインの要素あたりおよびサイクルあたりの平均コスト

関係式は次のように書き直すことができ:

$$Speedup = \frac{\xi + (1 - \xi) \cdot \psi}{\xi \cdot \gamma + (1 - \xi \cdot \gamma) \cdot \psi} \quad (318)$$

ここで、

$$\xi = \frac{C_A}{C_B} \quad \text{ドメイン間のサイクルあたりの平均コストの比}$$

$$\gamma = \frac{Nc_A}{Nc_B} = \frac{dt_B}{dt_A} \quad \text{時間ステップ比}$$

$$\psi = \frac{Ne_A}{Ne_A + Ne_B} \quad \text{時間ステップが最も小さいドメインにおける要素のパーセンテージ}$$

サイクルあたりの平均コストがこれら2つのドメインで同一の場合、式は次のようになります：

$$Speedup = \frac{1}{\gamma + (1 - \gamma) \cdot \psi} \quad (319)$$

したがって、 γ および ψ が0に近い場合、つまりドメインAがBに比べて小さく、時間ステップ比が大きい場合、速度上昇は非常に大きくなります。これは、[図 428](#)で示されている内容です。

モデルの設定

使用可能な2つのモデル設定を以下に示します：

- 単一入力ファイルフォーマット
- 複数入力ファイルフォーマット

Radiossは完全独立で実行され、相互の直接の通信は行われません。各サブドメインでは、以下に示すように、それ固有の時間ステップが使用されます。

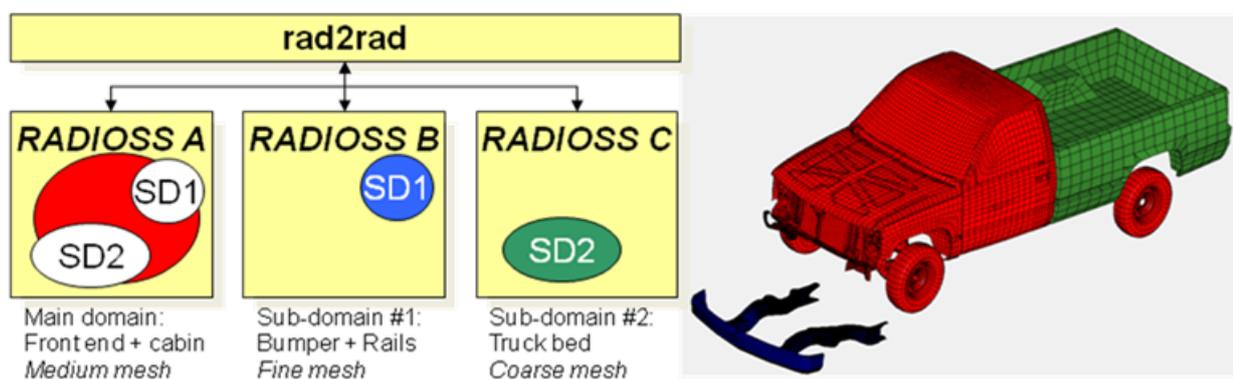


図 429:

それぞれのサブドメインの時間ステップは任意ですが、速度上昇の点で最高の結果を得るためには、それぞれは十分に異なるべきです。

最高のマニュアル分割は、全体モデルの片方を大きな時間ステップの大きな、要素数の多い大きなモデルに、もう片方を小さな時間ステップの少数の要素の小さなモデルに分割することにより得られます。

全てのデータ通信、時間ステップの同期、ドメイン境界でのつり合いと安定条件はメインプログラムで保障されます。

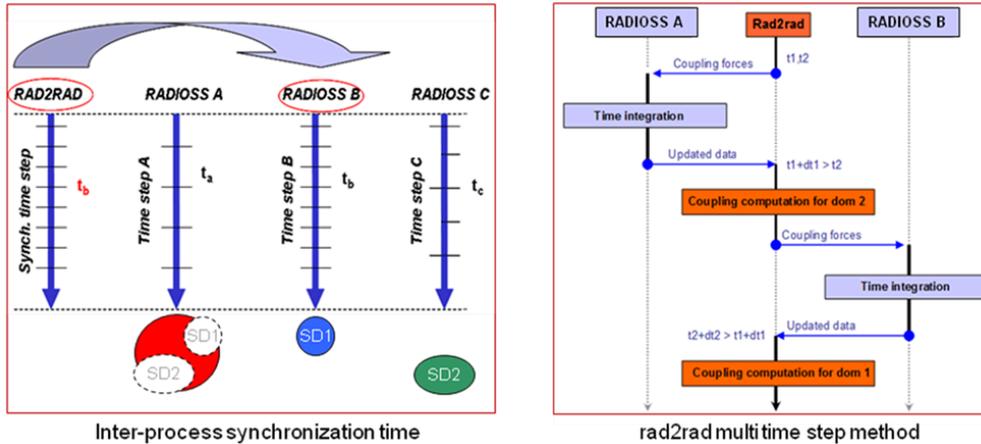


図 430:

14.0での新機能

14.0以降は、ALEおよび / またはSPHを含め、流体-構造相互作用シミュレーションが可能です。

13.0での新機能

13.0以降は、マルチドメインはHybrid-MPPと完全に互換性があります。つまり、RAD2RADで複数のスレッディングが可能です。

ヒント

計算パフォーマンスを向上させるには:

- 節点または要素の面で、サブドメインはフルドメイン(メイン _ サブドメイン)の30%未満である必要があります。また、サブドメインとメインドメインとの間の自然な(または許容可能なマスキング)時間ステップ比が1/3より低い必要があります。
- 純粋なLagrangeやFSIモデルと同じ、サブドメインに時間ステップが極めて小さいパートを配置するというルールを適用します。
- 純粋なLagrangeマルチドメインモデルの場合は、ドメイン間のコミュニケーションの流れを削減することでRAD2RADの作業負荷をできるだけ小さくする必要があり、この目的で、サブドメインとメインドメインとの間の接触インターフェースと接続部をできるだけ小さくする必要があります。
- サブドメインが全体接触インターフェースの一部でなく、それ固有のサブドメイン自己接触を有することを確認し、必要以上に大きくない、ドメイン間複数接触を作成することが重要です。
- 作成したそれぞれのドメイン間接触インターフェースを対称的にすることを強く推奨します。
- ALEまたはSPHを使用するマルチドメインの場合は、流体と構造との間の接触インターフェースを最小化する必要はありません。
- 要素数が比較的少ないサブドメインがあるモデルの場合、割り当てられるCPUの数は、CPUあたりの要素数は2000個以上にするという経験則を尊重する必要があり、使用されるクラスタの節点あたりのスレッド数を最大限に多くすることを推奨します。
- 1つのモデルにおいて、時間ステップが小さいパートが散在する場合は、複数サブドメインが必ずしも適切なわけではありません。これらのパートの時間ステップが同じように小さい場合は、それらを1つのサブドメインに配置する必要があります。
- サブドメインとメインドメインとの間の接続部にも小さい時間ステップがある場合は、これらの接続部をそのサブドメインに含める必要があります。

- サブドメインが基本的にLagrange3次元要素で構成されている場合は、2次元および1次元要素で構成されている場合よりも、マルチドメインの効率が低くなります。
- マルチドメインFSIの場合、メインドメインの流体、およびスケーリングファクターが0.5の要素自由時間ステップ (ALEの場合)を持つ定義された DT/ALE を使用することを推奨します。Lagrangeサブドメインでは、スケーリングファクターが0.9の節点時間ステップ $DT/NODA$ を使用する必要があります。

単一入力ファイルフォーマット

モデルの設定

Radiossマルチドメインテクニックでは、複数入力フォーマット設定が最初に導入されました。この設定の主な欠点は、独立した入力ファイルをユーザーがマニュアルで構築するという多数の作業が起こることです。それは非常に長く、困難で、非常に大規模で複雑なモデルから小さなドメインを取り出すのは間違いの元になり得ます。

単一入力ファイル設定の目的は、サブドメインを自動的に構築することでユーザーの作業を簡略化することです。古典的な計算のような、全モデルを含む1つのStarter入力ファイルのみが必要です。サブドメイン内に配置するモデルのパートのみ指定する必要があります。次に、Starterが全体モデルから指定されたドメインを自動的に取り出し、それぞれのドメインに対する1つのリスタートファイルを生成します。この方法の場合、サブドメインは1つだけですが、そのサブドメインは複数のパートで構成することが可能です。

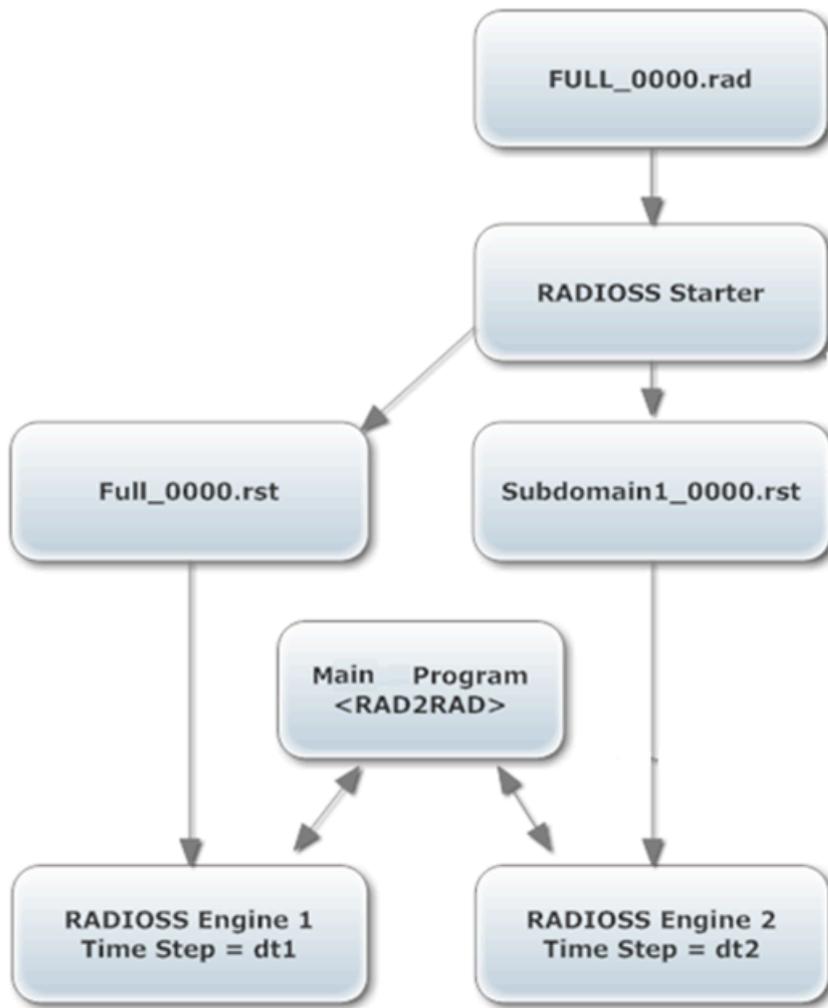


図 431: サブドメイン設定のアーキテクチャ

現時点では1つのドメインのみが指定できますが、この制限は将来改善される可能性があります。

サブドメインの自動生成

サブドメインは、パートのリストによって単純に定義されます。

分割モデル

サブドメイン生成の最初のステップはフルモデルを分割する事です。これは1つのドメインごとにStarterチャイルドプロセスを起動することでなされます。それぞれのプロセスは関連するパートに対応する節点と要素のみ保持します。/GRNOD、/GRPART または/SURFのようなエンティティグループも同様に分割され、多くのオプションでの分割が可能です(オプションが1つのドメインで参照されない場合、無効になります)。一部のオプションは、分割が複雑で、しばしばドメイン定義の修正を含む特別な取り扱いが必要になります。また、その他の一部のオプションは分割できません。マルチドメインに伴うオプションのより詳しい情報については、[現時点での制限事項](#)をご参照ください。

その結果、大抵の場合、サブドメインはユーザーにより指定されたパート(とそれに関連する節点と要素)と共に、あるオプションの分割によって自動的に追加されるいくつかの他の要素または節点から成ります。

ドメイン間の結合

第2のステップはドメイン間の相互作用の検知です。最初のタイプの相互作用は直接結合です。Starterがドメイン間の共通節点を自動検知し、節点と節点の結合を生成します。

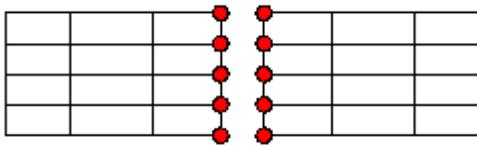


図 432:

ドメイン間の接触

2番目のタイプのドメイン間の相互作用は接触です。ドメイン間の接触力の計算は人工表皮法に基づきます。これは外部プログラムRAD2RADでは接触は計算されない事を意味しますが、2つのドメインの1つの内部がメインドメインと呼ばれます。

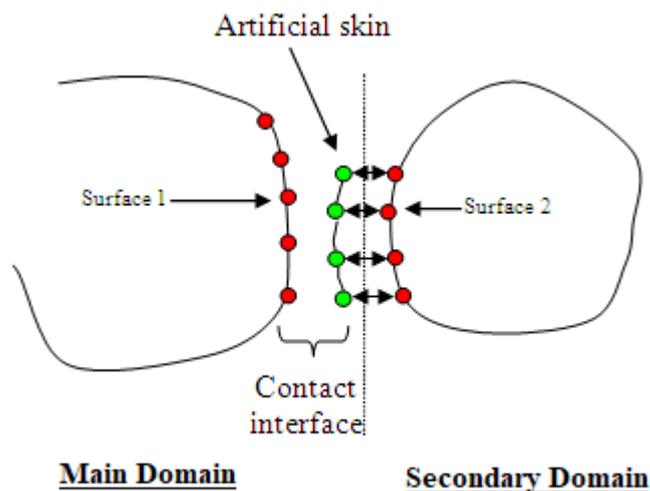


図 433:

単一入力ファイル設定では、ドメイン間の接触は常にサブドメインで計算されます。これは主に、時間ステップが最も小さいドメイン内で接触が扱われる場合、連成の質がはるかに良くなるためです。

したがって、サブドメインとの接触が関係するメインドメインのサーフェスは、このサブドメイン内に、同じ密度とヤング率を持つポイド材料で自動的に複製されます。その後、ドメインをまたぐ節点間の連成が、サブドメイン内の人工表皮の節点とメインドメイン内の元のサーフェスの節点との間で確立されます。

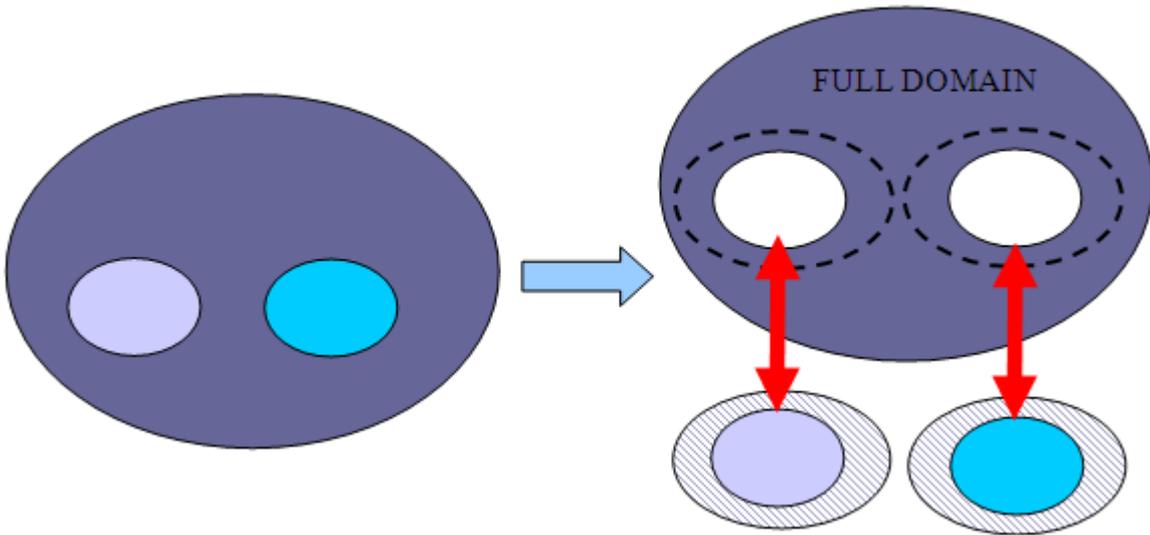


図 434:

これは、良いパフォーマンスを得るためには、メインドメインとサブドメインの間の全ての接触は特定の接触インターフェースに入れ、接触サーフェスは可能性のある全ての接触を含みながら、できるだけ小さくする必要があることを意味しています。例えば、1つの自己接触インターフェースのみが1つのサブドメインでモデルに用いられている場合、サブドメインはメインドメインの全てのパートに衝突する可能性があり、その時メインドメインがボイド材料でサブドメインに完全に複製されることとなります。RAD2RADのコストが巨大になり、そのパフォーマンスは非常に低下します。

注: 接触インターフェースが正しく定義されていない場合は、複製されたパートのサイズがフルモデルのサイズの50%未満だと、“multidomain interface is too big”という警告メッセージが発行されます。このパーセンテージが50%より大きい場合は、エラーメッセージが発行されます。

また、サブドメインがインターフェースのセカンダリ側またはメイン側のどちらかでのみ定義されている、非対称に定義されたドメイン間接触インターフェースを使用しないようにすることを強く推奨します。この場合は、接触インターフェースの一部のみがサブドメインで計算され、残りはメインドメインで計算されます。接触インターフェースが非対称にならないようにするために、ドメイン間接触インターフェースをシステムチックに対称化することを推奨します(サブドメインをドメイン間接触のメイン側とセカンダリ側の両方で定義するか、対称的な接触インターフェースの追加によって非対称な既存の接触を修正する)。

注: ドメイン間接触インターフェースが分割されると、“multidomain split contact interface”という警告メッセージが発行されます。

マルチドメインに適合するRadioss接触インターフェースは:

- /INTER/TYPE5
- /INTER/TYPE7
- /INTER/TYPE10
- /INTER/TYPE11
- /INTER/TYPE18

- /INTER/TYPE24 ((surf_ID₁surf_ID₁ > 0, surf_ID₂surf_ID₂ > 0)または(surf_ID₁surf_ID₁ > 0, surf_ID₂surf_ID₂ = 0)の場合)。(grnd_ID_s > 0, surf_ID₁surf_ID₁ = 0, surf_ID₂surf_ID₂ > 0)ではない場合。

ドメイン間のユーザー定義結合

いくつかの運動条件も、それらがマルチドメインインターフェースをまたがって定義されている場合、ドメイン間の結合を生成する可能性があります。

- 剛体: 剛体が2つのドメインを結合している時、特別な取り扱いが与えられます。剛体は2つに分割され、質量、慣性マトリックスと重心位置の計算はドメインごとに実行されます。その後、2つの剛体のパートの2つのメイン節点は、古典的な節点と節点の連成と同様ですが球状でない慣性に適合された定式化を用いてRAD2RADで連成されます。
- タイドインターフェース: タイドインターフェースTYPE2でメイン要素が1つのドメインにあり、セカンダリ節点がもう1つにある場合、異なる戦略が用いられます。戦略は接触に対して用いられるものと同様です。メイン要素はタイドインターフェースがこのドメインで完全に定義されるタイドインターフェースを持つ様にボイド材料でセカンダリ節点を含むドメインに複製されます。その後、マルチドメイン連成がメイン要素の節点のみに作用します。両方のドメインがセカンダリ節点を含む場合、メイン要素の複製が両側で実行されます。
- 剛結、RBE3および円筒ジョイント: 剛結とRBE3には同じ考え方が用いられます。これらのオプションがセカンダリ節点を2つのドメインに持つ場合、全ての失われた節点が両側に複製され、全てのセカンダリ節点がRAD2RADで連成されます。このオプションは次に両側で計算されます。

他の結合タイプは分割できません。これは、これらの接続部が1つのドメイン内のみで使用できることを意味し、連成ゾーンからは必ず必要があります。これらのオプションは:

- /MPC
- /RBE2
- /GJOINT

データ入力

Starter入力ファイル

サブドメインはパートで定義されます。

```
/SUBDOMAIN/subdomain_ID
subdomain_title
Part1 Part2 ... Partn
```

ここで、

Part_n	サブドメインに属するパートの識別子
subdomain_ID	ドメイン識別子
subdomain_title	サブドメイン名(1つのEngineファイルのルート名になる)

Engine入力ファイル

それぞれのドメイン毎に1つのEngine入力ファイルが必要で、マルチドメイン連成をアクティブにするため、ファイルは以下のディレクティブを含んでいる必要があります:

```
/RAD2RAD/ON
```

1つのEngineファイル名は、Starter入力ファイルのルート名 "full_model_rootname"_0001.radを使用して作成されます。また、サブドメインに関連する他のEngine入力ファイル名は、subdomain_title:を使用して作成されます (subdomain_title_0001.radこれは、Starter入力ファイルで /SUBDOMAINカードに指定されています)。

RAD2RAD入力ファイル

RAD2RAD入力ファイルはRAD2RADプログラムに必要ないくつかの付加情報を定義したテキストファイルです。RAD2RAD入力ファイルは、サブドメイン設定を使用してStarterにより自動生成されます。RAD2RADおよびEngineプロセスを起動する前に、マルチドメイン計算パラメータを変更するためにこれにアクセスし、修正することができます。このファイルの名前は、フルモデルのルート名に基づきます: "full_model_rootname"_0000.r2r

 注: RAD2RAD入力ファイルに関するより詳しい情報は、マルチドメインのドキュメントをご参照ください。

データ出力

Starter出力ファイル

ドメインごとに別個のStarter出力ファイルが生成されます。

時刻歴ファイル

両方のドメインからの全ての情報を含む、単一の時刻歴ファイルが生成されます。このファイルは、Starter入力ファイルと同じルート名を持ちます。このファイルの内容は、古典的な単一ドメイン計算で得られる内容と同じです。

時刻歴出力に対する全てのパラメータ(時刻歴のタイプ、出力頻度、フォーマットなど)を、メインドメインのEngineファイルで指定する必要があります。時刻歴に対するパラメータがサブドメインのEngine入力ファイルで指定されても、それらは無視されます。

THファイルの出力の頻度はメインドメインにより定義されるため、THファイルの2つの出力間の許容される最小時間間隔はメインドメインの時間ステップになります。精度を上げるために、メインドメインの時間ステップよりも高い時間頻度を使用することが推奨されます。

ABFファイル

各Radioss Engineにより1つのABFファイルが生成されます。したがって、モデル全体のグローバル変数をプロットするには、各ドメインのグローバル変数を加算する必要があります。

出力ファイル

各ドメインの出力ファイル(各Engine出力)に出力されるグローバル変数を単純に合計することにより、モデル全体のグローバル変数を計算できます。

2つの例外があります:

- エネルギーエラー: エネルギーバランスは、各ドメインで他のドメインとは別に計算されます。つまり、各ドメインではマルチドメインの連成力は外力と見なされ、その仕事量は外力の仕事量に加算されます。この仕事量はエネルギーバランスの計算のために内部的にのみ使用されます。出力ファイルまたは時刻歴に出力される外力の作業量値には含まれません。
- 質量の変化: 質量の変化も局所的に計算されます。つまり、このドメインの質量に対する、選択したドメインで追加された質量の比になります。

アニメーションファイル

各Engineにより一連のアニメーションファイルが生成されます。HyperViewでは、オーバーレイを行うことにより2つのドメインを同時に可視化することが可能です。

RAD2RAD出力ファイル

RAD2RAD実行モジュールにより、rad2rad.outという出力ファイルが生成されます。このファイルには、ドメイン間の結合に関する有用な情報(共通節点の数、連成のタイプなど)が含まれます。

SPEEDUP予測

バージョン14.0以降は、マルチドメイン法の潜在的効率を判断するために、Starterで速度上昇の予測が計算されます。値は、メインドメインのStarter出力ファイルに出力されます。そのため、計算中に1つのドメインで時間ステップが大幅に変化した場合、速度上昇予測は適切ではなくなります。

Engine入力ファイルで定義されている時間ステップ制御オプション(/DT/NODA/CST、/DTIX、...)が、Starterでの時間ステップ予測で考慮されます。

CPUの割り当て

Radiossドメインは順次取り扱われるため、一度に1つのRadiossプロセスだけが実行されることとなります。合計CPUリソースは自動的に実行中のプロセスに割り当てられ、他はCPUを消費しない待機モードになります。サブドメイン設定を使用して、すべてのドメインに同じ数のSPMDドメインが自動的に割り当てられます。パフォーマンスの向上のためには、Hybrid-MPPでの実行時に、ドメインごとにSPMDドメインあたりのSMPスレッドと同じ数のSMPスレッドを使用する必要があります。

バージョン12.0.210以降、RAD2RAD実行モジュールは完全に並列化されています。つまり、RAD2RADはEngine実行モジュールとまったく同様に起動する必要があります(同じmpiオプション)、またEngineとRAD2RADプロセスの両方に同じ数のSPMDドメインを使用する必要があります。

マルチドメイン解析の起動

マルチドメイン計算の起動には、Altair Compute Consoleを使用する方法と手動で行う2つの方法があります。

1. より簡単なマルチドメイン計算の起動はAltair Compute Consoleを用いることです。
 - a) 入力ファイルとしてマルチドメイン用Starterファイルを選択し、シミュレーションに使用するCore数を定義します。その後、Compute ConsoleがStarter、Engine、およびRAD2RADプロセスを実行します。Radiossを使ったAltair Compute Consoleの使い方については、[Altair Compute Console \(ACC\)](#)を参照してください。
2. マルチドメイン計算を起動するために、コマンドラインを用い、入力ファイルを含む作業ディレクトリを探します。
3. Starterを端末でコマンドを使って起動します:

オプション	内容
Linux	<code><install_dir>/hwsolvers/bin/linux64/starter_version -i "rootname"_0000.rad</code>
Windows	<code><install_dir>\hwsolvers\bin\win64\starter_version -i "rootname"_0000.rad</code>

4. RAD2RADを端末でコマンドを使って起動します:

オプション	内容
Linux	<install_dir>/hwsolvers/bin/linux64/r2r_version "rootname"_0000.r2r
Windows	<install_dir>\hwsolvers\bin\win64\r2r_version "rootname"_0000.r2r

RAD2RADはそれぞれのドメインからRadiossに接続されるのを待ちます。

 **注:** ファイル"rootname"_0000.r2rはStarterにより自動的に生成されます。

5. それぞれのドメインのEngineを別の端末で起動します:

オプション	内容
Linux	<install_dir>/hwsolvers/bin/linux64/engine_version -i "rootname"_0001.rad
Windows	<install_dir>\hwsolvers\bin\win64\engine_version -i rootname_of_the_subdomain"_0001.rad

全てのRadiossプロセスはこれで自動的にRAD2RADに接続されます。

6. SMPスクリプトを起動します。

```
Linux : run_linux_SMD
./s_<version>_linux64 -i FULL_0000.rad

./e_<version>_linux64 -nt 4 -i FULL_0001.rad > out_1 &
./e_<version>_linux64 -nt 4 -i SUBDOM_0001.rad > out_2 &
./r2r_<version>_linux64 -nt 4 FULL_0000.r2r
```

```
Windows : run_win_SMD.bat
E:\Rad2rad\s_<version>_win64.exe -i FULL_0000.rad

set KMP_STACKSIZE=64M
start /B E:\Rad2rad\e_<version>_win64.exe -nt 4 -i FULL_0001.rad > out1
start /B E:\Rad2rad\e_<version>_win64.exe -nt 4 -i SUBDOM_0001.rad > out2
start /B E:\Rad2rad\r2r_<version>_win64.exe -nt 4 FULL_0000.r2r
```

```
Windows (cygwin) : run_win_SMD
./s_<version>_win64.exe -i FULL_0000.rad;

./e_<version>_win64.exe -nt 4 -i FULL_0001.rad > out1&
./e_<version>_win64.exe -nt 4 -i SUBDOM_0001.rad > out2&
./r2r_<version>_win64.exe -nt 4 FULL_0000.r2r;
```

7. SPMDスクリプトを起動します。

```
Linux : run_linux_SPMD
./s_<version>_linux64 -np 4 -i FULL_0000.rad

mpiexec -n 4 ./e_<version>_linux64_mpi -i FULL_0001.rad > out_1 &
mpiexec -n 4 ./e_<version>_linux64_mpi -i SUBDOM_0001.rad > out_2 &
mpiexec -n 4 ./r2r_<version>_linux64_mpi FULL_0000.r2r
```

```
Windows : run_win_SPMD.bat
E:\Rad2rad\s_12_main_win64.exe -np 4 -i FULL_0000.rad

set KMP_STACKSIZE=64M
start /B mpiexec -n 4 E:\Rad2rad\e_<version>_win64_mpi.exe -i FULL_0001.rad > out1
start /B mpiexec -n 4 E:\Rad2rad\e_<version>_win64_mpi.exe -i SUBDOM_0001.rad > out2
```

```
start /B mpiexec -n 4 E:\Rad2rad\r2r_<version>_win64_mpi.exe FULL_0000.r2r
```

```
Windows (cygwin) : run_win_SPMD
./s_<version>_win64.exe -np 4 -i FULL_0000.rad;

mpiexec -n 4 ./e_<version>_win64_mpi.exe -i FULL_0001.rad > out1&
mpiexec -n 4 ./e_<version>_win64_mpi.exe -i SUBDOM_0001.rad > out2&
mpiexec -n 4 ./r2r_<version>_win64_mpi.exe FULL_0000.r2r;
```

現時点での制限事項

1つのサブドメインのみ定義できます。

これらのオプションは/SUBDOMAINと互換性がありません。

- /DFS/DETPOINT/NODE
- /FX_BODY
- /SPHBCS

以下の結合は1つのドメイン内でのみ用いることができますが、マルチドメインインターフェースをまたがる連成ゾーンに用いることはできません。

- /GJOINT
- /MPC
- /RBE2

マルチドメインは全てのLagrange乗数に基づいた運動条件と適合しません。連成の定式化と適合しないためです。

マルチドメインは、節点が接触インターフェースタイプ1またはドメインを跨ぐインターフェースの一部でない限り、インターフェースAMS(アドバンストマススケーリング)、レイリー減衰(/DAMP)、動的緩和(/DYREL)に適合していません。

GAUGE、INTERおよびRWALタイプのセンサーはドメイン間で同期されません。つまり、センサーおよびその全ての関連機能が1つのドメイン内に収まっていない場合、このセンサーの挙動は正しくない可能性があります。一方、DIST、ACCEおよびTIMEタイプのセンサーはマルチドメインに完全に適合し、ドメイン間で同期されます。

複数入力ファイルフォーマット

モデルの設定

Radiossマルチドメインテクニックでは、最初に複数入力フォーマット設定が導入されました。それぞれのサブドメインは分割された完全なRadiossモデルとして構成され、固有の完成された入力ファイルを用います。Radioss Engine計算間の連携は、各Radiossモデルで定義されているドメイン間の結合に基づくRAD2RADプログラムによって確実になります。

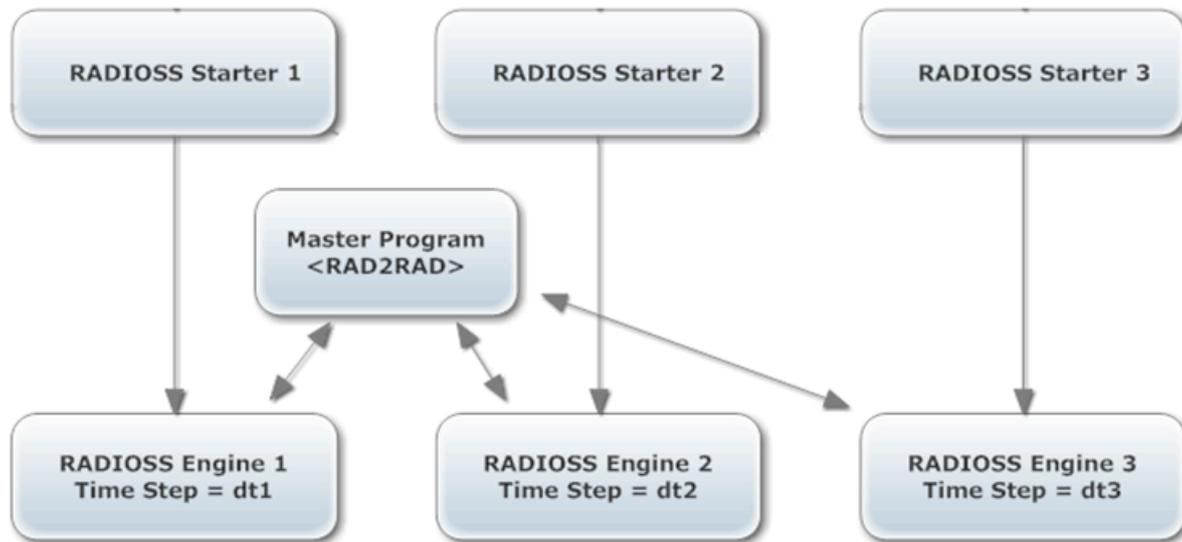


図 435:

ドメイン間の結合

2つのドメイン間の結合(またはリンク)は、必ず、相互に結合される対応する2つのメッシュに関連する2つの節点グループ、およびこの結合の種類によって定義されます。以下はRAD2RADで利用可能な結合タイプのリストです。

タイプ1: シェルとシェル(**Schur Dual法**)

これはLagrange乗数によるシェル要素メッシュのリンクに用いることができます。メッシュは適合か非適合で、インターフェースは開いているか閉じていることができます。

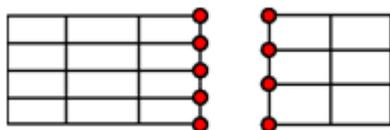


図 436:

注: 非適合メッシュと開いたインターフェースでは、2つの面の開始点と終了点は必ず一致している必要があります。同様に、閉じたインターフェースの場合でも、2つの面の間で少なくとも少なくとも1つの共有点がある必要があります。

タイプ2: シェルとビーム(**Schur Dual法**)

このタイプのリンクはタイプ1と非常によく似ていますが、ビーム / シェル結合に適合します。

注: 非適合メッシュの場合、シェルパートに対する制限はタイプ1と同じです。

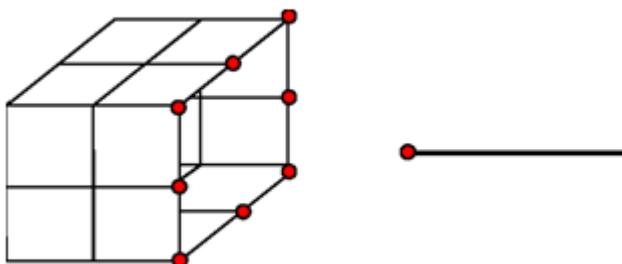


図 437:

タイプ4: 節点と節点 (Schur Primal法)

適合メッシュの場合、ドメイン間の結合は、単純な節点と節点の関係に縮退します。

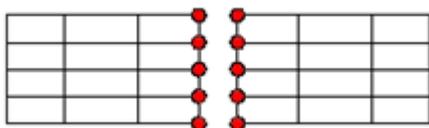


図 438:

この方法は適合メッシュに対するタイプ1と厳密に等価ですが、マトリックスの重ね合わせもその逆行列が実行されないため大幅に少ないCPU時間消費で済みます。また、この場合は、節点データのみが必要となるため、どの種類の節点を結合するためにも使用できます(どの種類の要素にも結合される)。

 注: シェルとソリッドの結合の場合、並進自由度成分のみに連続条件が作用します。

ドメイン間の接触

TYPE 5: 結合

人工表皮法を使用してドメイン間の接触を計算することもできます。RAD2RADでは接触は計算されませんが、2ドメインの1つの内部がメインドメインと呼ばれます。したがって、接触が関係するセカンダリドメインの一部はメインドメイン内に同じ密度とヤング率を持つポイド材料として複製される必要があります。接触はメインドメイン内部でRadiossによって通常に取り扱われ、節点と節点の固有の結合タイプ5 (結合タイプ4と同様)は人工表皮の節点とセカンダリドメインの対応する節点との結合に使用される必要があります。

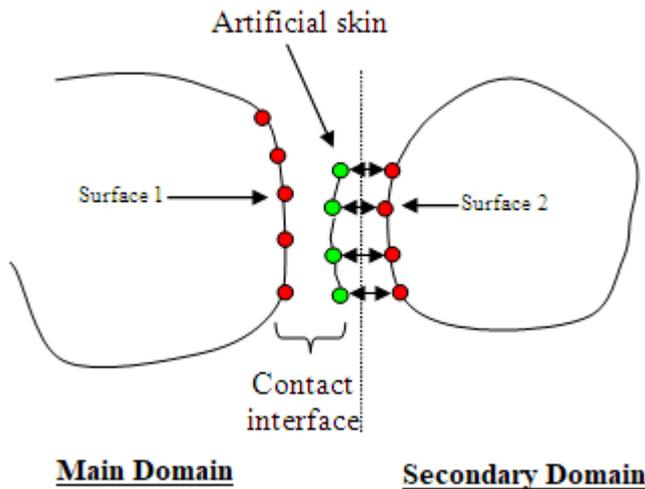


図 439:

マルチドメインのメイン入力ファイルで、結合タイプ5の定義は、メインドメインでの節点(人工表皮の節点)が最初に宣言されなければならない点を除いて、他の結合と同様です:

```
/LINK/TYP5
Main_Domain Link_Id1
Second_Domain Link_Id2
```

マルチドメインに適合するRadioss接触インターフェースは:

- /INTER/TYP5
- /INTER/TYP7
- /INTER/TYP10
- /INTER/TYP11
- /INTER/TYP18
- /INTER/TYP24 ($(surf_ID_1surf_ID_1 > 0, surf_ID_2surf_ID_2 > 0)$ または $(surf_ID_1surf_ID_1 > 0, surf_ID_2surf_ID_2 = 0)$ の場合)。($grnd_ID_s > 0, surf_ID_1surf_ID_1 = 0, surf_ID_2surf_ID_2 > 0$)ではない場合。

注: RAD2RAD結合タイプ 5はLagrange乗数法定式化を用いた接触インターフェースと適合しません。質量と節点剛性はRAD2RADの結合タイプ5によりセカンダリドメインから人工表皮へと伝達されます。したがって、メインドメインでの質量と節点時間ステップの修正が計算の最初で見られます。

マルチドメインのメイン入力ファイルで、結合タイプ5の定義は、メインドメインでの節点(人工表皮の節点)が最初に宣言されなければならない点を除いて、他の結合と同様です:

```
/LINK/TYP5
Main_Domain Link_Id1
Second_Domain Link_Id2
```

運動学的拘束がセカンダリドメインのメインドメインに複製される部分に作用した場合、それは同様に複製されます。

- 剛体の複製の場合には、そのメイン節点はRAD2RAD結合タイプ5に指定される必要があります。
- インターフェースタイプ2の複製の場合、追加のフラグ/TIEDがRAD2RAD入力ファイル内で指定される必要があります。

マルチドメイン解析の起動

マルチドメイン計算の起動には、マニュアルとスクリプトによる2つの方法があります。

SMPスクリプトの例

SPMDスクリプトの例

1. マルチドメイン計算を起動するために、コマンドラインを用いて、個別のドメイン(`_0000.rad`と`_0001.rad`)とマルチドメインメイン入力ファイル(`input.dat`)の入力ファイルを含む作業ディレクトリを確認します。
2. コマンドを使ってそれぞれのドメインのStarterを端末で起動します:

オプション	内容
Linux	<code><install_dir>/hwsolvers/bin/linux64/s_version -i "filename"</code>
Windows	<code><install_dir>\hwsolvers\bin\win64\s_version -i "filename"</code>

3. RAD2RADを端末でコマンドを使って起動します:

オプション	内容
Linux	<code><install_dir>/hwsolvers/bin/linux64/r2r_version input.dat</code>
Windows	<code><install_dir>\hwsolvers\bin\win64\r2r_version input.dat</code>

RAD2RADはそれぞれのドメインからRadiossに接続されるのを待ちます。

4. それぞれのドメインのEngineを別の端末で次のように起動します:

オプション	内容
Linux	<code><install_dir>/hwsolvers/bin/linux64/e_version -i "filename"</code>
Windows	<code><install_dir>\hwsolvers\bin\win64\e_version -i "filename"</code>

全てのRadiossプロセスはこれで自動的にRAD2RADに接続されます。

より簡単なマルチドメイン計算の起動はスクリプトを用いることです。

5. それぞれのドメインのStarterを上で記述したのと同じ方法で起動します。
6. 作業ディレクトリでスクリプトに`run_SMP`または`run_SPMD`を加えます。
7. スクリプトでは、入力ファイルの名前を変え、実行モジュールの場所(MPI、RAD2RADとRadioss Engine)とプロセスの数を必要であれば指定します。
8. 端末でスクリプトを実行します。

SMPの例

```
Linux : run_linux_SMP
./s_<versin> < PART1_0000.rad
./s_<version> < PART2_0000.rad
./e_<version> < PART1_0001.rad > out_1 &
./e_<version> < PART2_0001.rad > out_2 &
```

```
./r2r_<version> input.dat
```

```
Windows : run_win_SMP.bat
E:\Rad2rad\s_<version>.exe -i PART1_0000.rad
E:\Rad2rad\s_<version>.exe -i PART2_0000.rad
set KMP_STACKSIZE=64M
start /B E:\Rad2rad\e_<version>.exe -i PART1_0001.rad > out1
start /B E:\Rad2rad\e_<version>.exe -i PART2_0001.rad > out2
start /B E:\Rad2rad\r2r_<version>.exe input.dat
```

```
Windows (cygwin) : run_win_SMP
./s_<version>.exe < PART1_0000.rad;
./s_<version>.exe < PART2_0000.rad;
./e_<version>.exe < PART1_0001.rad > out1&
./e_<version>.exe < PART2_0001.rad > out2&
./r2r_<version>.exe data4.dat;
```

SPMDの例

```
Linux : run_linux_SPMD
./s_<version> < PART1_0000.rad
./s_<version> < PART2_0000.rad
/opt/hpmpi/bin/mpirun -np 4 ./e_<version> < PART1_0001.rad > out_1 &
/opt/hpmpi/bin/mpirun -np 4 ./e_<version> < PART2_0001.rad > out_2 &
../exec/r2r_<version>_impi data4.dat
```

```
Windows : run_win_SPMD.bat
E:\Rad2rad\s_<version>.exe -i PART1_0000.rad -n 4
E:\Rad2rad\s_<version>.exe -i PART2_0000.rad -n 4
set KMP_STACKSIZE=64M
start /B mpiexec -n 4 E:\Rad2rad\e_<version>.exe -i PART1_0001.rad > out1
start /B mpiexec -n 4 E:\Rad2rad\e_<version>.exe -i PART2_0001.rad > out2
start /B E:\Rad2rad\r2r_<version>.exe input.dat
```

```
Windows (cygwin) : run_win_SPMD
./s_<version>.exe < PART1_0000.rad;
./s_<version>.exe < PART2_0000.rad;
mpiexec -n 4 ./e_<version>.exe < PART1_0001.rad > out1&
mpiexec -n 4 ./e_<version>.exe < PART2_0001.rad > out2&
./r2r_<version>.exe data4.dat;
```

RAD2RAD並列化

マルチドメインインターフェースのサイズが大きい場合、RAD2RADでの連成力の計算に使われる時間が長くなり得ます。連成の計算タスクを複数のプロセッサに分割することで、時間の削減が可能になりました。単一入力ファイル設定とは異なり、複数入力ファイル設定の場合は、RAD2RADのSMP並列化のみを使用可能です。用いることのできるプロセッサの数は、RAD2RADが起動されたハードウェアのノードで可能なコア数よりも少ない数が用いられる必要があります。例えば、8コアのマシンでの6は良い値です。RAD2RADのスレッドの数は、Engineと同様にコマンドラインで`-nt`を使用して指定するか、RAD2RAD入力ファイルでキーワード`/PROC/nthread`を使用して直接指定できます。

 注: RAD2RADの並列化によるCPU時間上の効果は、RAD2RADで取り扱われるノードの数が少ない($Cpu数 \times 1000$)場合、無視できる程度です。

 注: RAD2RADがアクティブな場合は結合されたRadioss Engineが休止しているため、RAD2RADの並列化はEngineの並列化とは無関係になります。これは、あるプロセッサをRAD2RADに割り当てるだけでなく、あるプロセッサを全てのEngineに割り当てられることを意味します。それらは、順々に用いられます。

MPIの設定

マルチドメインとSPMD Engine実行モジュールを用いる時、以下のMPI環境変数がパフォーマンス改良のために用いられる必要があります。

- HP-MPI: *MPI_FLAGS*をy0に設定
- Open-MPI: *OMPI_MCA_mpi_yield_when_idle*を1に設定
- Intel-MPI: デフォルトの設定を用いることが可能

出力ファイル

- Radioss: 別々の出力ファイルがそれぞれのRadiossプロセスにより生成されます。
- RAD2RAD: *rad2rad.out*という名の特別な出力ファイルがRAD2RADにより生成されます。

現在のバージョンの制限

- それぞれのサブドメインは、完全なものとして構成されます。それぞれの完全な入力ファイルを使って、Radiossモデルを分離します。
- Radiossプロセスとメインプログラム間のデータ通信には、通信のパイプシステム法を用います。全てのRadioss EnginesとRAD2RADは同じハードウェアノードで開始される必要があります。
- ドメイン間の共通節点での運動条件は、結合TYPE5とのみ適合します。
- RAD2RADプログラムは、複数入力ファイル設定の場合は並列化されません。このことで、大きなサブドメインが多くCPU数で実行される時、マルチドメイン計算のパフォーマンスが下がる可能性があります。
- 現在、マルチドメイン計算はメインプログラムから自動実行はされません。全てのRadioss StartersはRAD2RADプログラムが起動される前に実行される必要があります。バッチ計算は可能ですが、RAD2RADと全てのRadioss Engineプロセスは1つのハードウェアノードで独立、並列に起動される必要があります。
- それぞれのRadiossドメインでは、リンクの数は15に、CPUの数は128に制限されています。

例: RAD2RAD入カファイル

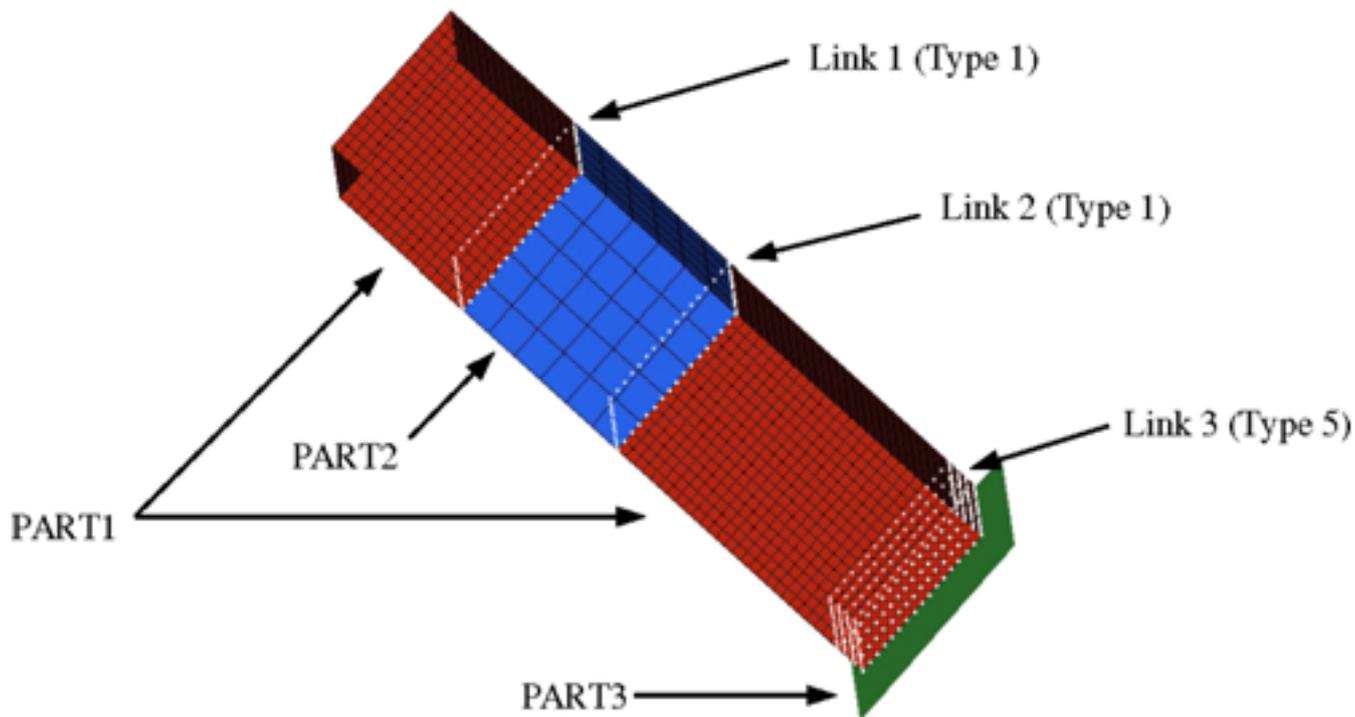


図 440: モデル

RAD2RAD入カファイル

```

$=====
$ RAD2RAD R8 INPUT FILE :
$=====
$ 1. PARTS DEFINITION
$=====
/DOMAIN/PART1
1 2 3
/DOMAIN/PART2
4 5
/DOMAIN/PART3
9
$=====
$ 2. INTERFACES DEFINITION
$=====
/LINK/TYPE1
PART1 2
PART2 5
/LINK/TYPE1
PART1 1PART2 4
/LINK/TYPE5
PART3 9
PART1 3
$=====
$3 OPTIONS
$=====
/MLTPS/ON
0.1 0.1
/MESHL/MORFIN
/RADIUS/1e-7
/END $=====

```

設計最適化

Radiossの最適化はバージョン13.0で追加されました。OptiStructの最適化機能を起動しながら、同時に解析にRadiossソルバーを使用することにより実装されます。

Radiossの最適化は、Radiossユーザーが簡単に最適化の問題を設定し、OptiStructの最適化ソリューションを活用できるようにします。最適化ランの実行には、等価静的荷重法 (ESLM) が使用されます。

インプリメンテーション

Radiossの最適化機能には、通常のStarterとEngine入力ファイルのほかに追加の入力ファイルが必要です。

この追加のファイルは、<name>.radoptという名前の最適化入力ファイルです (StarterとEngineファイルの名前は通常、それぞれ<name>_0000.radと<name>_0001.radになります)。最適化入力ファイル (<name>.radopt) は、最適化目的、最適化制約、設計変数、最適化応答などの最適化エンティティを定義します。モデルの最適化に必要な典型的な入力データのセットを以下に示します。対応する入力データを定義するために選択可能なRadiossの様々な最適化エンティリについても解説します。

最適化目的

最適化目的は、最適化実行の全体的な目的を定義します。実社会でのモデルの用途の要件に基づいて決定されます。例えば、最適化された自動車の設計の全体的な目的が、車両の質量を最小化することである場合があります。最適化目的は、最適化応答を選択し、応答が最小化されるか最大化されるかを指定することにより、Radiossで定義できます。最適化目的の定義には、/DESOBJデータエンティリを使用します。

最適化の制約条件

最適化制約は、特定の最適化応答の上限または下限あるいはその両方を定義します。したがって、モデルは、選択した応答の値が定義された範囲または制約内に収まるように最適化されます。例えば、目的が質量の最小化である構造については、関心領域での応力応答を最適化制約として定義できます。選択した領域の応力が、特定の値 (上限) を超えないように制約できます。Radiossでの最適化制約の定義には、/DCONSTRデータエンティリを使用します。

設計変数

設計変数は一般的に、モデルのプロパティを最適化実行に関連付けます。/DVPREL1エンティリを使用して、システムの物理プロパティ (シェルの板厚など) にリンクできます。設計変数は、最適化目的および最適化制約に基づいて (定義された範囲内で) 変化します。設計変数の定義は、/DESVAR (寸法最適化)、/DTPL (トポロジー最適化)、/DSIZE (フリー寸法最適化)、/DSHAPE (フリー形状最適化)、および/DTPG (トポグラフィ最適化) を使用して行えます。

Radiossでの使用法の詳細については、該当するデータエンティリのドキュメントをご参照ください。OptiStructユーザーにとっては、Radiossの最適化入力エンティリは、同じ名前のOptiStructの最適化エンティリに非常に似ています (例えば、/DTPLはOptiStructのDTPLバルクデータエンティリに似ています)。

バルクデータのOptiStruct入力ファイルへの伝達

情報は、1つのRADOPTランから中間OptiStruct入力ファイルへと渡されます。/BULK、/BULKFMT、/BULKMATおよび/BULKPROPブロックフォーマットエンティリが使用できます。

環境変数の設定

最適化中にRadiossによって使用されるコア数は、OptiStructスクリプトオプション`-rnt`および`-rnp`を使って定義できません。

単精度、またはRadiossの特定のバージョンなど、より高度なRadiossオプションを使う必要がある場合は、以下の環境変数を設定します。

Linux (bash) :

```
export RADIOSS_SCRIPT=$ALTAIR_HOME/altair/scripts/radioss
export RADIOSS_ARGS=" -np 24 -nt -2 -sp -v 2019"
```

Windows

```
set RADIOSS_SCRIPT=%ALTAIR_HOME%\hwsolvers\scripts\radioss.bat
set RADIOSS_ARGS=" -np 24 -nt -2 -sp -v 2019"
```

`RADIOSS_SCRIPT`を介して定義されたスクリプトは、RadiossOuterloopシミュレーションが完了した際に、OptiStructによって実行されます。`RADIOSS_ARGS`オプションは、`RADIOSS_SCRIPT`への引数として使用されます。`RADIOSS_SCRIPT`は、StarterとEngineの両方で実行するスクリプトでなければなりません。

実行オプション

OptiStructでRadioss最適化入力ファイル`<name>.radopt`を実行するには、`-radopt`実行オプションを使用します。これにより、OptiStructは同じ作業ディレクトリ内でRadioss StarterおよびEngineファイルを探します。

Use Solver GUI

入力ファイルとして`<name>.radopt`を設定し、オプションとして`"-radopt`」を使用します。

OptiStructによって用いられるSMPコアの数を指定するには、`-nt`オプションを使用します。Radiossの場合、`-rnt`と`-rnp`を使って指定します。これは、Radiossシミュレーション実行時の`-np`および`-nt`オプションと同じです。

ソルバースクリプトを使用する場合 (Linuxマシン) `[optistruct@host~]$ $ALTAIR_HOME/scripts/optistruct <name>.radopt -radopt`

OptiStructソルバースクリプトを使用する場合 (Windowsマシン) `[optistruct@host~]$ $ALTAIR_HOME/hwsolvers/scripts/optistruct.bat <name>.radopt -radopt`

Radiossソルバースクリプトを使用する場合 (Windowsマシン) `[optistruct@host~]$ $ALTAIR_HOME/hwsolvers/scripts/radioss.bat <name>.radopt -radopt`

実行モジュールへの直接コールを使用する場合 (Linuxマシン) `[optistruct@host~]$ $ALTAIR_HOME/hwsolvers/optistruct/bin/linux64/<optistruct_executable> <name>.radopt -radopt`

実行モジュールへの直接コールを使用する場合 (Windowsマシン) `[optistruct@host~]$ $ALTAIR_HOME/hwsolvers/optistruct/bin/win64/<optistruct_executable> <name>.radopt -radopt`

StarterおよびEngineファイル(`<name>_0000.rad`および`<name>_0001.rad`)が、`<name>.radopt`と同じディレクトリに置かれている必要があります。

/DTPLでMMOCID=1を使用するMMO(Multi-Model Optimization: マルチモデル最適化)の場合、以下に示すコマンドで実行します。

```
[optistruct@host~]$ $ALTAIR_HOME/hwsolvers/optistruct/bin/win64/<optistruct_executable> -mmo <name>.fem
```

例:

最適化では2つの荷重ケースが考慮される必要があります。そのうえで、各荷重ケースについてはRadioss最適化ファイル<name>.radoptを作成し、MMOの定義には、下に示すように .femファイル(この例では mmo_topo.fem)を作成します。下記でMMOを実行します:

```
[optistruct@host~]$ $ALTAIR_HOME/hwsolvers/optistruct/bin/win64/<optistruct_executable> -mmo -mpi -np 3 -rnt 2 mmo_topo.fem
```

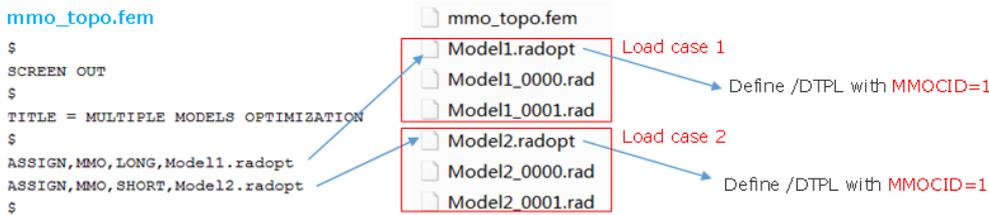


図 442:

最適化プロセス

Radiossは3つのファイル全て(最適化、StarterおよびEngineファイル)を解析して最適化モデルを構築します。各最適化反復に対して、更新/最適化されたStarterファイル(<name>_rad_s#_i###_0000.rad)およびEngineファイル(<name>_s#_i###_0001.rad)が書き出されます。ここで、###は最適化反復番号です。

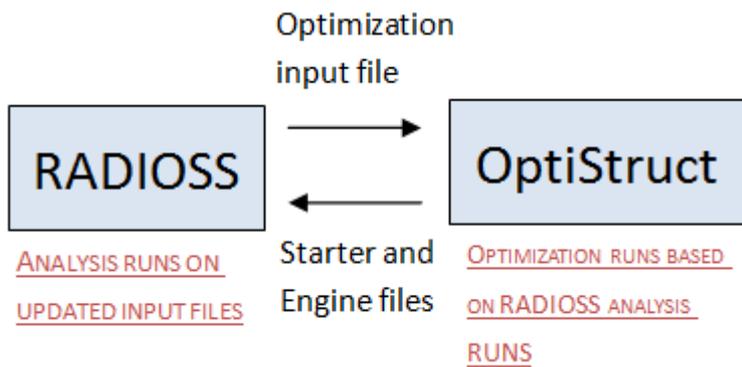


図 443: Radiossでの最適化プロセス概要

更新されたRadioss StarterおよびEngineファイルはRadiossにより解かれ、結果はOptiStruct最適化モデルを更新するためにOptiStructに伝達されます。

 **注:** Radioss最適化を用いたソリッドトポロジー最適化には、直接密度コントロールが使用されます。線形静的応答トポロジー最適化が完了した後、設計変数として0から1までの値を有するソリッド要素が有限要素モデル内で更新されます。各ソリッド設計要素には、関連するトポロジー設計変数と等しい値を有する充填パーセンテージが直接割り当てられます。これにはRadiossオプション/INIBRI/FILLが使用され、充填パーセンテージをトポロジー設計変数とマッピングします。

実装手順

以下の手順は、Radiossで最適化を実装するために使用する逐次プロセスを示しています：

- 1. 最適化プロセス**で指定されたシンタックスを使って、最適化ファイル<name>.radoptをOptiStructに渡します。OptiStructは同じディレクトリ内で自動的に<name>_0000.radと<name>_0001.radを検索します。
- OptiStructはRadioss入力ファイルを解析し、同等のOptiStructモデルを構築し、このOptiStructモデルの実行を続行します。
- OptiStructは最適化された設計変数を適用し、更新/最適化されたRadioss Starter/Engineファイル (<name>_rad_s#_i###_0000.radと<name>_s#_i###_0001.rad)を書き出します。最初の外側ループでは、設計変数はまだ更新されず、Starter/Engineファイルは初期ユーザー入力と同じになります。
- Radiossが手順3で生成された、更新されたStarter/Engineファイルを解きます。
- OptiStructが手順4で得られたRadiossの結果を読み取り、次の最適化実行(内側ループ)を開始します。
- Radiossからの結果が、前の外側ループと比較してしきい値をはるかに超えている場合、最適化プロセスは収束していません。
- この場合、Radioss解析からの更新された結果に対して最適化プロセスが(ESLM法を使用して)続行され、新たに最適化された設計変数が生成されます。それ以降の反復でプロセスが収束するかどうかを確認するために、手順3~6が繰り返されます。収束した場合は、手順8に進みます。
- プロセスが終了し、最適化された結果が出力されます。

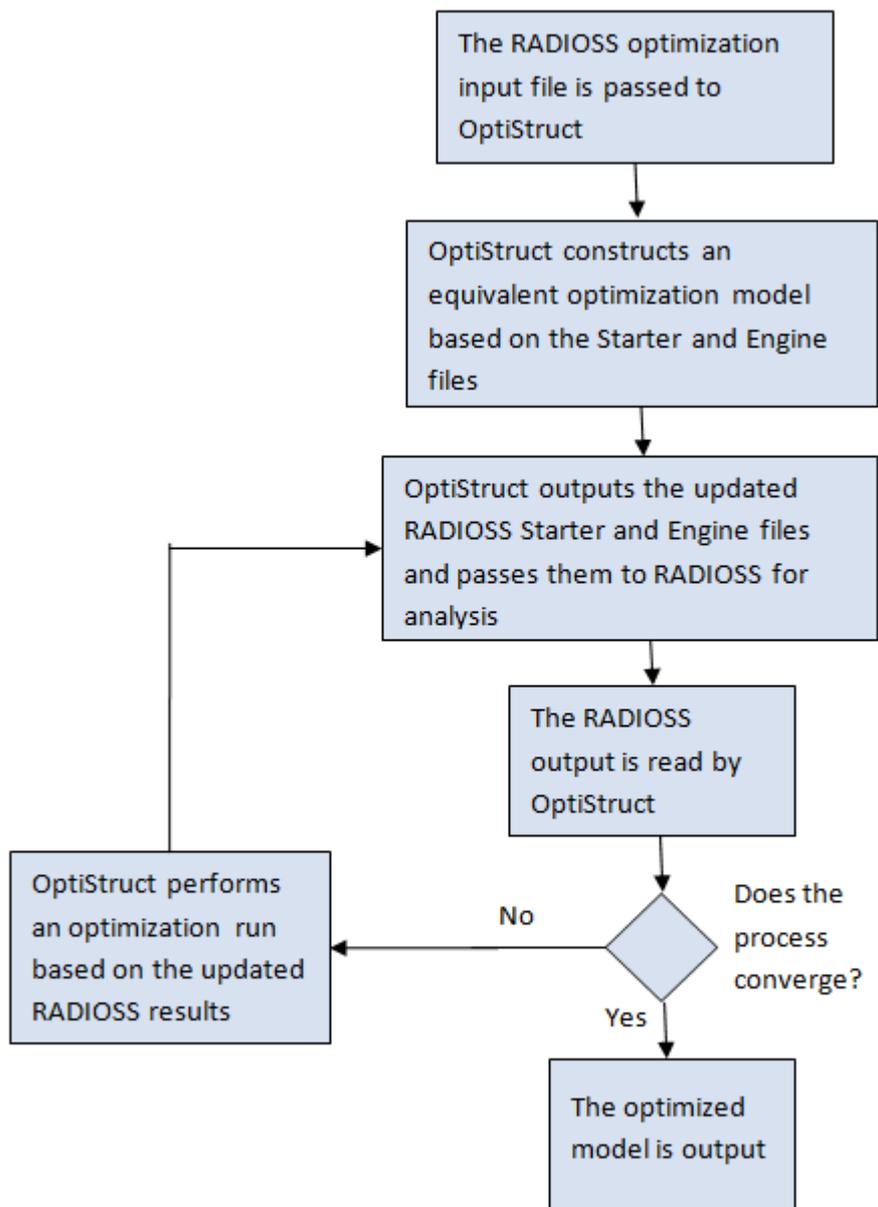


図 444: RadiossとOptiStructにおける最適化のシーケンス

エラーメッセージデータベース

ここでは、エラーメッセージを小さい番号から順に示します。

1～299

エラー119

```
ERROR ID :      119
** ERROR IN INTERFACE DEFINITION
DESCRIPTION :
-- INTERFACE ID: 3
-- INTERFACE TITLE: contact
LAGRANGIAN SURFACE IS EMPTY
```

概要:

2D解析(/ANALY内の $N_{2D3D}=1$ または2)では、すべてのメッシュはYZ平面内に存在し、さらにY軸正側かつZ軸正側に存在している必要があります。メッシュがY軸負側またはZ軸負側にある場合、接触するサーフェスは見つからず、このエラーメッセージが出力されます。

推奨される解決策:

プリプロセッサ(HyperMeshまたはHyperWorks)で、すべてのメッシュをY軸正側かつZ軸正側に移動します。

エラー189

```
MESSAGE ID :      189
** ERROR : BEGIN IS NOT A VALID KEYWORD
MESSAGE ID :      189
** ERROR : MAT IS NOT A VALID KEYWORD
```

概要:

このメッセージが表示されるのは通常、単一ファイル入力フォーマットが使用されており、Engineキーワードが定義されていない場合です。

見出しには、Starterファイルで使用される"#RADIOSS STARTER"と、単一ファイル入力(1つのファイルにStarterとEngine)で使用される"# RADIOSS"が示されます。単一ファイル入力では、Engineパートが"/END/ENGINE"で終了することも必要です。

```
#RADIOSS STARTER
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/BEGIN
main TEST4
  140      0
  Mg      mm      s
  Mg      mm      s
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
#- 1. CONTROL CARDS:
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/TITLE
LOI 33
```

```
# RADIOSS
/RUN/TEST4/1
0.33300
/PRINT/-100
/PARITH/ON
/ANIM/DT
0. 0.1
/ANIM/GZIP
/TFILE
1.000000e-03
/ANIM/BRICK/TENS/STRESS
/ANIM/BRICK/TENS/STRAIN
/DT/NODA
0.67 1.e-05
/MON/ON
/END/ENGINE
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/BEGIN
main TEST4
  140      0
  Mg      mm      s
  Mg      mm      s
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
#- 1. CONTROL CARDS:
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/TITLE
LOI 33
```

Engine keywords defined

図 445:

見出しに"# RADIOSS"が示されているが、Engineが定義されていない場合は、エラーメッセージID 189が発行されま

す。

```
# RADIOSS
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/BEGIN
main TEST4
  140      0
  Mg      mm      s
  Mg      mm      s
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
#- 1. CONTROL CARDS:
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
/TITLE
LOI 33
```

Single file input
NO Engine keywords defined

図 446:

推奨される解決策:

"#RADIOSS STARTER"という見出しを使用するか、Engineキーワードを追加します。

エラー197

```

ERROR ID :          197
** ERROR IN INPUT DATA
DESCRIPTION :
-- PROPERTY ID : 521003304
-- PROPERTY TITLE : New PROP 521003304
REFERENCE DIRECTION IS ALMOST NORMAL TO SHELL ID=662193988

```

概要:

Starterでこのメッセージが出力されるのは、プロパティ(基準ベクトル / スキュー)で定義されている方向がシェル要素に対してほぼ垂直である場合です。

ソルバーは、基準方向がシェル要素に対してほぼ垂直なプロパティのID(この例では521003304)とシェル要素ID(この例では662193988)を提示します。

ソルバーは、シェル要素の法線に沿ってベクトルVを投影するか(下図の左側)、スキューの方向Xをシェル要素上に投影します。ベクトルVがシェル要素に対して垂直な場合、シェル要素上へのベクトルの投影は失敗し(シェル上のベクトルV投影の投影は1つのポイントになります)、ソルバーは直交異方性の方向1を特定できないため(下図の右側)、このエラーメッセージが表示されます。

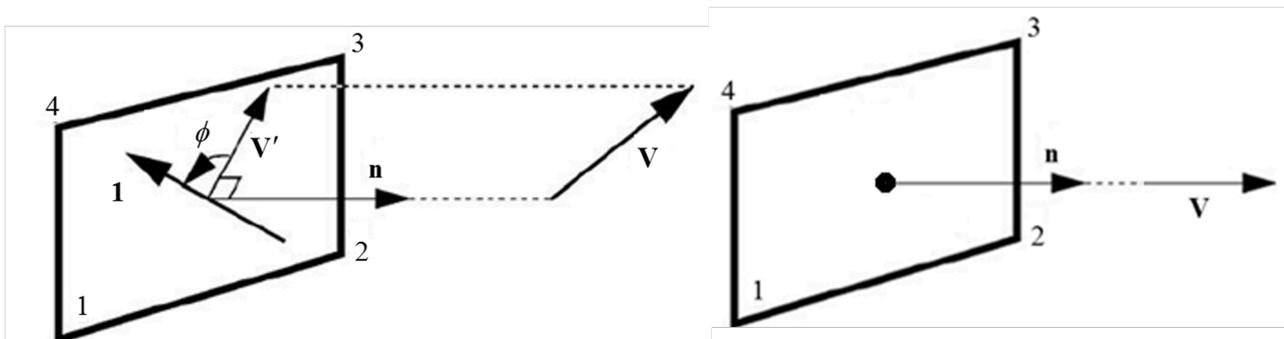


図 447:

推奨される解決策:

Starterによって報告されるプロパティ内のベクトルの方向を変更する必要があります。

 注: ベクトルの方向を変更すると、直交異方性の方向が変化します。

材料が実際には直交異方性($E_{11}=E_{22}$ かつ $G_{12}=G_{23}=G_{31}=E_{11}/(2*(1+\nu_{12}))$)でない場合は、ベクトルを変更しても結果は変化せず、任意のベクトルを指定できます($V_X=V_Y=V_Z=1$)。

材料が直交異方性である場合は、直交異方性の方向を特定し、この方向をプロパティに入力する必要があります。パートの形状が複雑な場合は、必要に応じてパートを複数のセクションに分割し、デックベクトルを入力してください。

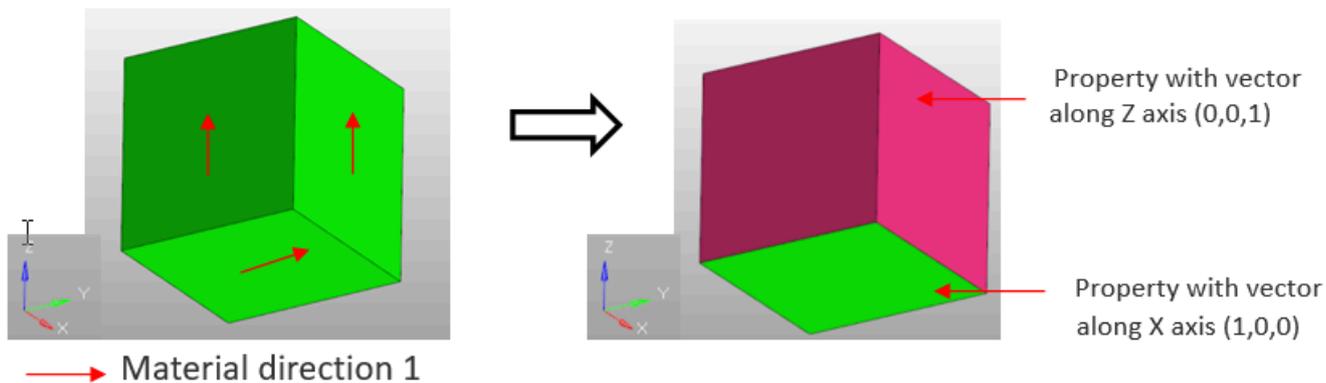


図 448:

エラー223

```

ERROR ID: 223
** ERROR IN BEAM DEFINITION

DESCRIPTION :
  IN BEAM ID=1, N1 and N3 HAVE SAME LOCATION

SOLUTION:
  CHANGE N1 OR N3 COORDINATES
    
```

概要:

ビーム要素は、局所フレームの初期位置を決定するために方向節点(N3)を必要とします。この節点(N3)の座標は、N1およびN2とは異なる必要があります。この座標は、N1とN2によって定義される軸上であってはいけません。

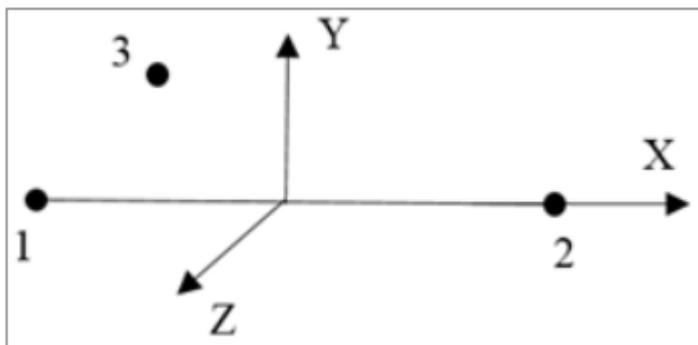


図 449:

推奨される解決策:

この問題は次のように手動で修正できます:

- ビーム断面が円形または正方形 ($I_{yy}=I_{zz}$) である場合は、同じN3をすべてのビーム要素に割り当てることができます。主な要件は、選択したすべてのビームに対して有効な節点を選択することです。N3は、選択したどのビームの軸上にあってもいけません。
- $I_{yy} \neq I_{zz}$ の場合でも、同じ節点N3を複数のビーム要素に割り当てることができます (N1-N2によって定義されるそれらのビーム要素の局所X軸がほぼ同じである場合)。ビームの局所X軸がほぼ同じでない場合は、ビームごとに異なるN3を選択してください。N3は、ビームの軸上にあってははいけません。

300～699

エラー480

```

ERROR ID :          480
** ERROR IN MATERIAL LAW
DESCRIPTION :
-- MATERIAL ID : 521002880
-- MATERIAL TITLE : Default MAT24 MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY.2
EPS_T MUST BE STRICTLY LESS THAN EPS_M

```

概要:

材料則LAW27とLAW36では、引張での破壊が定義されている場合、いくつかの規則に従う必要があります。この例で、ソルバーは材料521002880について、 $\epsilon_t > \epsilon_m$ となっているが、この状態は許可されていないと報告しています。

推奨される解決策:

LAW36の例:

$Eps_t < Eps_m < Eps_f$

PLAS_TAB *****	
ID	521002880
Title	Default MAT24 MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
Local Unit System	None
[RHO_I] Initial density*	7.82E-6
[RHO_0] Reference density	0
[E] Young's modulus*	206.8
[Nu] Poisson's ratio*	.3
[Eps_p_max] Failure plastic strain	.4
[Eps_t] Tensile failure strain	.2
[Eps_m] Tensile failure strain	.24
[C_hard] Hardening coefficient	0
[F_smooth] Strain rate smoothing	<input checked="" type="checkbox"/>
[F_cut] Cutoff frequency for strain rate filtering	10
[Eps_f] Maximum tensile failure strain	.28

図 450:

LAW27の例:

$EPS_t1 < EPS_m1 < EPS_f1$

$EPS_t2 < EPS_m2 < EPS_f2$

PLAS_BRIT	
[RHO_0] Initial density*	1E-6
[E] Young's modulus*	1
[NU] Poisson's ratio	0
[a] Plasticity yield stress*	.1
[b] Plasticity hardening parameter	1
[c] Strain rate coefficient	0
[n] Plasticity hardening exponent	0
[SIG_max0] Plasticity maximum stress	0
[EPS_DOT_0] Reference strain rate	d
[EPS_t1] Tensile failure strain in principal strain dir. 1	.2
[EPS_m1] Maximum tensile failure strain in principal str	.24
[d_max1] Maximum tensile failure damage in principal :	0
[EPS_f1] Tensile strain for element deletion in principa	.28
[EPS_t2] Tensile failure strain in principal strain dir. 2	.2
[EPS_m2] Maximum tensile failure strain in principal str	.24
[d_max2] Maximum tensile failure damage in principal :	0
[EPS_f2] Tensile strain for element deletion in principa	.28

図 451:

エラー592

```

ERROR ID :          592
** ERROR IN STARTER INPUT DECK FORMAT
DESCRIPTION :
INPUT VERSION=0
LINE : /VERS/2017
SOLUTION :
/BEGIN CARD IS COMPULSORY FOR STARTER INPUT VERSION >= 50

```

概要:

ソルバーは/BEGINカードを想定していますが、代わりに異なるキーワードを検出しました。例: /VERS/2017

このメッセージが表示される代表的な原因は次のとおりです:

- ヘッダーには別個のStarterファイルとEngineファイルが示されていますが、Engineファイルはヘッダーの下にある。
- /BEGINまたは/ENDが欠落している。

エラー611

```

MESSAGE ID :          611
** ERROR IN INITIAL PENETRATION IN INTERFACE
DESCRIPTION :          189
-- INTERFACE ID : 11
-- INTERFACE TITLE : Global interface Gap 0.49 Shells Only
INACTI = 6
IMPOSSIBLE TO CHANGE NODE COORDINATES OF SECONDARY NODE : 823868424
** INITIAL PENETRATION = 0.4900000e+00 IMPOSSIBLE TO CALCULATE NEW COORDINATES OF SECONDARY
NODE*****

```

概要:

ソルバーがこのメッセージを出力するのは、初期貫通している節点の新しい座標候補を計算できない場合です。ソルバーは次の情報を提供します:

- 新しい位置を計算できなかった節点のID(この例では823868424)
- インターフェイスID(この例では11)

推奨される解決策:

HyperCrashまたはHyperMeshで、このエラーが発生したインターフェースIDの初期貫通を確認します。最小残余距離 (Res. Dist. 列)で初期貫通をソートします。

ほとんどの場合、Starterが新しい位置を計算できない節点は、残余距離が0である節点となります。すなわち、それらの節点は最初にメインセグメント上にあります。

これらの節点をリストで選択し、画面上でハイライト表示します (HyperMeshの )。



図 452:

このタイプの問題の原因となり得る一般的なモデリングエラーとして、次の3つが挙げられます。

1. 溶接またはボルトを表すスプリングが全体接触に含まれています。これらを削除する必要があります。

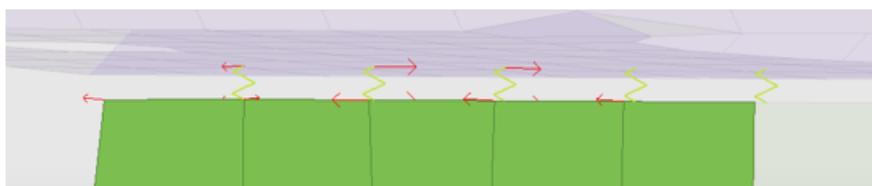


図 453:

2. メッシュの問題:

メッシュ内のいくつか亀裂が生じている領域で、節点同士を結合する必要があります (HyperMeshを使用)。

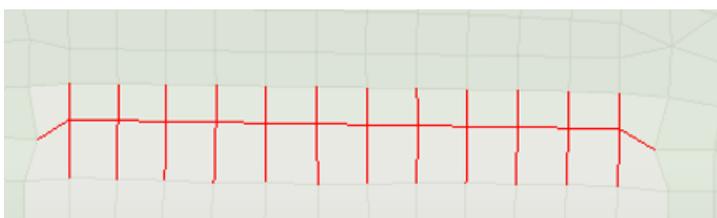


図 454:

ソリッドメッシュ上にスキンが存在しており、スキン / ソリッドの節点が結合されていません。これらの節点同士を結合する必要があります (HyperMeshを使用)。

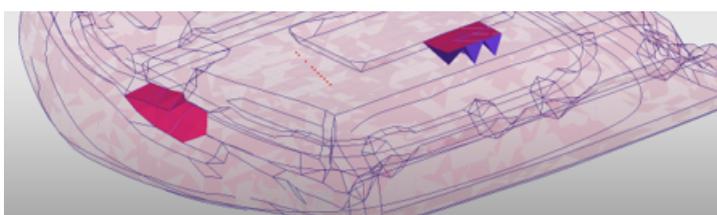


図 455:

3. ギャップ0のソリッド間接触。これはインターフェースTYPE7、TYPE11、TYPE19ではサポートされていません。節点を移動してギャップ(0.1mm)を生じさせるか、インターフェースTYPE24を使用してください。

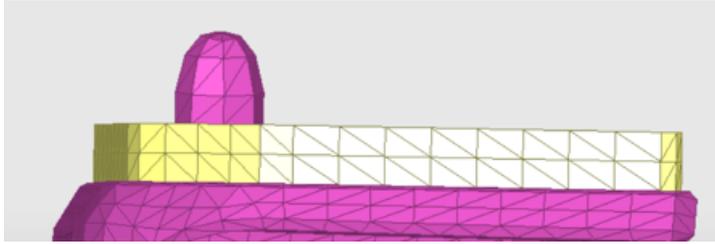


図 456:

700～1199

エラー953

```
ERROR ID :          953
** ERROR WHILE READING PARAMETERS
DESCRIPTION :
UNEXPECTED END OF FILE
ERROR ID :          968
** INPUT ERROR
DESCRIPTION :
ERROR WHILE READING STARTER INPUT FILE
```

概要:

一般にこのエラーが発生するのは、パラメータが入力に含まれており、ファイルの末尾で/ENDが欠落している場合です。ほとんどの場合、このエラーは、ジョブがスクラッチディレクトリへのコピーを完了する前にサブミットされたときに発生します。

推奨される解決策:

入力ファイルの末尾に/ENDを追加するか、すべての入力ファイルのコピーを完了します。

エラー958

```
ERROR ID :          958
** ERROR DURING PARAMETERS EVALUATION
ERROR ID :          952
** ERROR IN STARTER INPUT DECK FORMAT
DESCRIPTION :
INPUT VERSION=0
LINE : /PARAMETER/GLOBAL/INTEGER/6620015
```

概要:

このエラーが発生するのは、ソルバーがパラメータの値を評価できない場合です。これは通常、式が不完全であるか(HyperCrashでその式の値を確認してください)、式で参照されているパラメータがモデル内で定義されていない場合に生じます。

推奨される解決策:

パラメータ"Time1"は"ActTTF" + 20と等しくなります。パラメータ"ActTTF"が定義されていないため、ソルバーは"Time1"の値を評価できません。

```

#RADIOSS STARTER
#-----
#- RADIOSS DECK WRITTEN BY HyperCrash
#HyperCrash 2017.4 (64 bits)
#Mon Apr 15 17:43:07 2019
#-
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|
/PARAMETER/GLOBAL/INTEGER/6620015
vent_size_mm
VSize          55
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|
/PARAMETER/GLOBAL/REAL/6620020
Active Vent leakage
VLeak          .8
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|
/PARAMETER/GLOBAL/REAL/6620021
Seam leakage
SLeak          .0175
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|
/PARAMETER/GLOBAL/REAL_EXPR/6620022
Active vent leakage curve
Time1      ActTTF+20
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|

```

図 457: 例

エラー1078

```

ERROR ID : 1078
** ERROR: TIED INTERFACE
DESCRIPTION :
  -- INTERFACE ID: 1
  -- INTERFACE TITLE: new Contact
  1 SECONDARY NODE(S) ARE DEACTIVATED FROM INTERFACE
    SECONDARY NODE: 82                NO MAIN SEGMENT FOUND WITHIN 1.00000000000000E-02

```

概要:

ソルバーがこのメッセージを出力するのは、1つの節点がインターフェースTYPE2に含まれており、この節点の検索距離内でメインセグメントが見つからず、フラグ“Ignore”が1000に設定される場合です。

ソルバーは、検索距離(この例では1.0e-2)内でメインセグメントが見つからなかったインターフェースID(この例では1)および節点ID(この例では82)を提示します。

HyperCrashのモデルチェッカーは、このタイプのエラー(Secondary nodes no proj.)を検知します。

The screenshot shows a tree view of error messages. Under 'Interface Cards(1)', there is a sub-entry 'Secondary nodes no proj.' with a red icon and the number '1' next to it. Below this, there is a checkbox labeled 'Create node group with unprojected nodes' which is checked.

図 458:

推奨される解決策:

この問題を解決するには、以下のようないくつかの方法があります:

- *Ignore* = 1を使用するか(それらの節点を結合する必要がない場合)、これらの節点をインターフェースTYPE2から削除します。
- 投影が見つからない節点を平行移動して、検索距離内に収まるようにします。
- 検索距離を少し大きくします (D_{search})。

TYPE2	
ID	1
Title	new Contact
Local Unit System	None
[Ignore] Flag to ignore secondary nodes if no	1000: No deletion of secondary nodes (defa
[Spotflag] Spotweld formulation	0: Default, set to value defined in /DEFAULT/
[Isearch] Isearch: Formul. for search of clos	0: Default, set to value defined in /DEFAULT/
[Dsearch] Dsearch:Dist. for closest main seg	.1
[Ide] Node deletion	0: Default, set to value defined in /DEFAULT/
[ithe] Heat transfer flag	0: no heat transfer
[Iproj] Secondary node projection flag	0: default, set to 1
[Secon_id] Secondary nodes*	[115] INTER_group_115_of_NODE
▶ [Secon_id] Secondary nodes (Advanced selector)	
[Surf_id] Main surface*	[96] INTER_group_105_of_SEGMENT

図 459:

エラー1104

```

ERROR ID :          1104
** ERROR WHILE BUILDING SURFACE FROM SOLID PARTS
DESCRIPTION :
-- SURFACE ID : 830005865
-- SURFACE TITLE : New SURF 830005865
UNAVAILABLE OPTION /SURF/PART/Surf_ID FOR CREATING SURFACE
SOLUTION :
FOR A PART OF SOLIDS
USE /SURF/PART/EXT/Surf_ID or /SURF/PART/ALL/Surf_ID

```

概要:

ソルバーがこのメッセージを出力するのは、ソリッド要素が含まれたPARTが/SURF/PARTに含まれている場合です。このキーワードを使用すると、3Dではなく2D要素のみからサーフェスを構築できます。

推奨される解決策:

1. HyperCrashのモデルチェッカーで、**Volumic Parts in Surf**という名前のチェックを実行します。
2. **Switch to Surf Ext**または**Switch to Surf All**を選択し、キーワードを自動的に/SURF/PART/EXTまたは/SURF/PART/ALLに切り替えます。

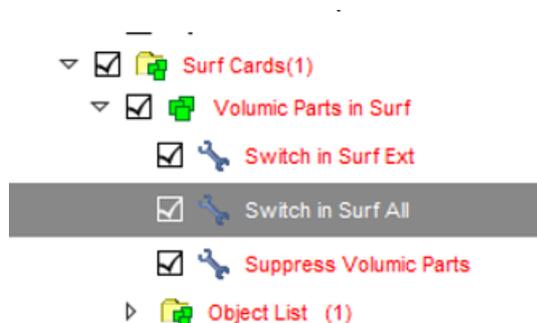


図 460:

エラー1130

```

ERROR ID :          1130

```

```
** ERROR IN USER INTERFACE  
DESCRIPTION :  
OPTION : /MAT/USER1  
USER INTERFACE OPTION USED, BUT NO USER INTERFACE ROUTINE IS FOUND
```

概要:

Starterがこのメッセージを出力するのは、Starterがユーザー材料(LAW29)を読み取ったときに、この材料の挙動とフォーマットを設定するユーザーライブラリが定義されていない場合です。

推奨される解決策:

ユーザー材料を、適合し、サポートされている他のRadioss材料キーワードに置き換えます。

Engineのエラーメッセージ

MASS OR ENERGY ERROR DUE TO CONTACT

```

**WARNING MINIMUM TIME STEP 0.248E-04 IN INTERFACE 11 (DTMIN= 0.2500E-04)
REMOVED SECONDARY NODE 63086879 FROM INTERFACE

MESSAGE ID : 206
** RUN STOPPED : ENERGY ERROR LIMIT REACHED

*** NODE WITH HIGHEST MASS CHANGE

```

概要:

いくつかのケースでは、接触の時間ステップを一定に保つために過大な質量が追加されるため、シミュレーションが失敗し、ERROR終了することがあります。

接触の安定性を維持するために、なぜ質量を追加する必要があるのでしょうか？

- /DT/NODA/CST、/DT/NODA/CST2、または/DT/INTER/CSTが使用されている場合、時間ステップは一定です。

- インターフェースの時間ステップは次のように計算されます: $\Delta t = \sqrt{\frac{2m}{K}}$

剛性は、貫通量 $K = K_0 \frac{Gap^2}{(Gap - p)^2}$ に応じて増大します。

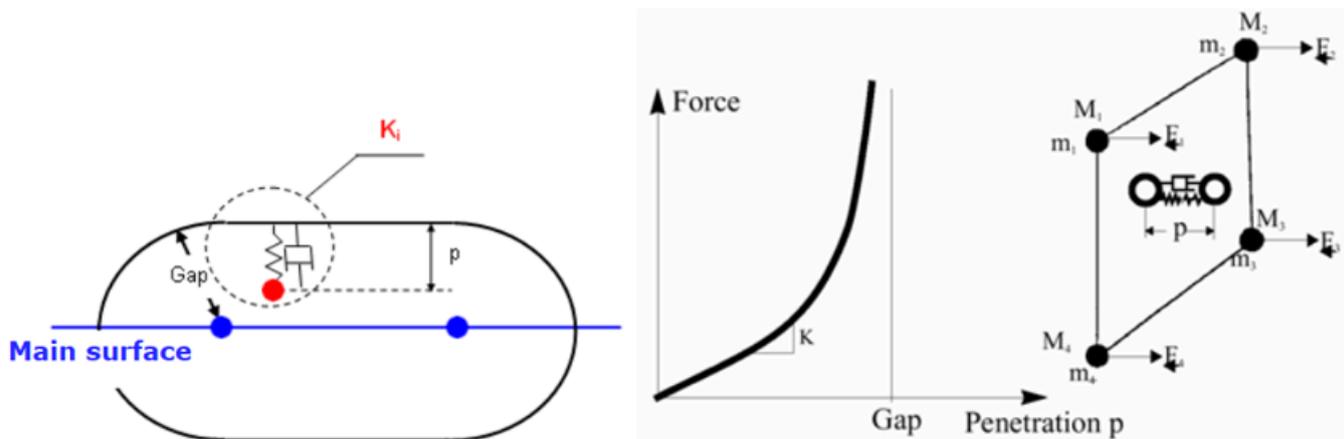


図 461:

接触内の貫通量が増大するにつれ、剛性の増大によって、時間ステップを一定に保つため質量が増加します。

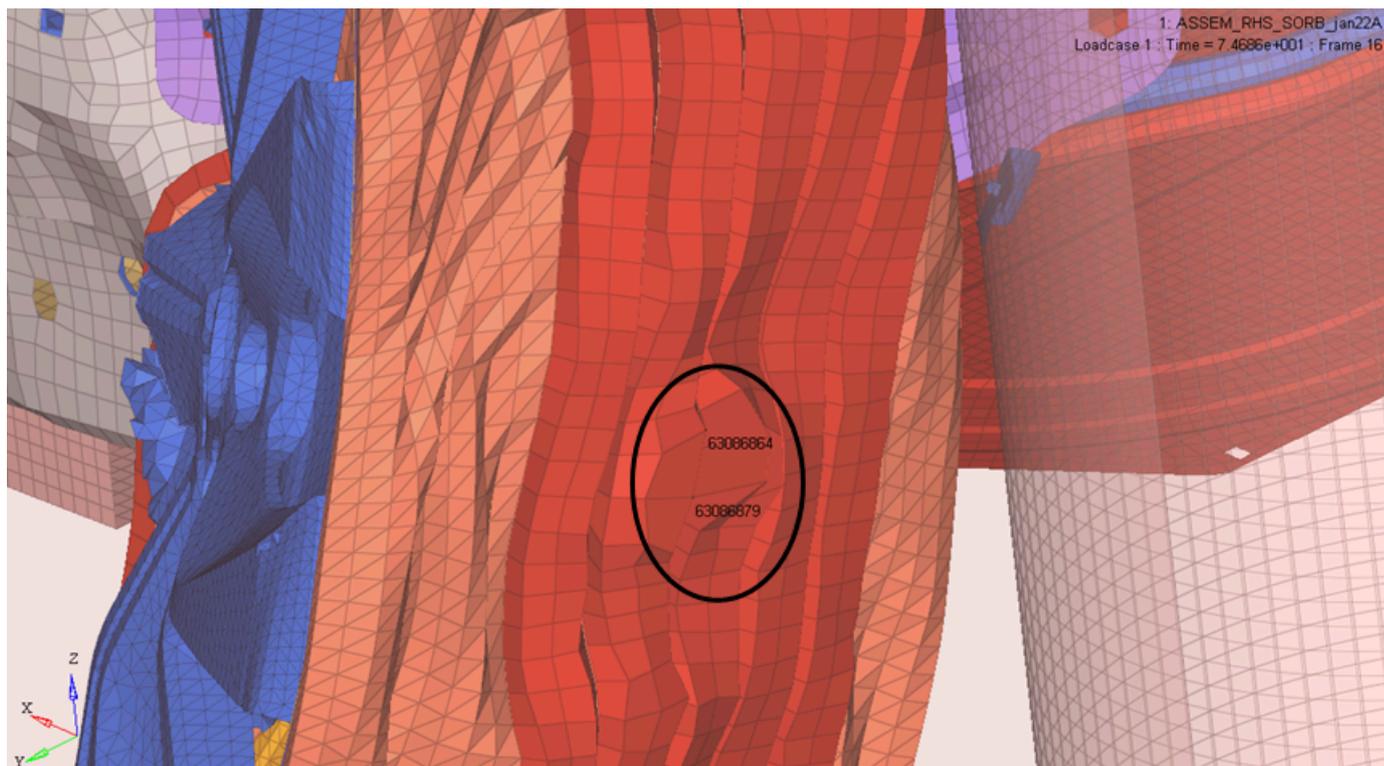


図 462:

```

**WARNING MINIMUM TIME STEP 0.2484e-04 IN INTERFACE 11(DTMN= 0.2500e-04)
REMOVE SECONDARY NODE 63086864 FROM INTERFACE 11
**WARNING MINIMUM TIME STEP 0.2484e-04 IN INTERFACE 11(DTMN= 0.2500e-04)
REMOVE SECONDARY NODE 63086879 FROM INTERFACE 11

MESSAGE ID : 206

** RUN STOPPED : ENERGY ERROR LIMIT REACHED

189137 74.69 0.1943E-04 NODE 63109533 99.9% 0.2295E+06 0.4643E+10 784.8 -4904. 0.1574
ANIMATION FILE: ASSEM_RHS_SORB_jan22A016 WRITTEN

  NODE VELOCITY K-ENER MASS MASS0 DM/MASS0
  63086864 7941. 0.1205E+05 0.3821E-03 0.3821E-03 0.000
  63086879 4845. 283.9 0.2418E-04 0.2418E-04 0.000
  63109654 2449. 73.93 0.2466E-04 0.2466E-04 0.000
  63110454 709.5 3.127 0.1242E-04 0.1242E-04 0.000
  15063500 238.9 0.7197 0.2522E-04 0.2522E-04 0.000
  15228459 200.6 0.2494 0.1239E-04 0.1239E-04 0.000
  50559051 199.7 0.4943 0.2478E-04 0.2478E-04 0.000
  15050554 198.2 0.000 0.000 0.000 0.000
  63109653 194.2 0.000 0.000 0.000 0.000
  15063617 190.0 0.4293 0.2379E-04 0.2379E-04 0.000

*** NODES WITH HIGHEST MASS CHANGE

  NODE MASS MASS0 DM/MASS0
  63086864 0.3174E-03 0.3425E-04 0.2048E+07
  63086879 0.5536E-03 0.6182E-04 0.1597E+07
  63109654 0.1952E-03 0.2815E-04 0.1192E+06
  63109653 0.4837E-03 0.7405E-04 0.8804E+05
  
```

図 463:

たとえば、タイヤは剛性バリアと重なっています。タイヤの背後では、ブレーキディスク(またはキャリパー)によってタイヤがバリアに押し付けられます。全体接触は剛性が不十分であるため、大きな貫通を生じさせます。

- 剛性の増大

- 時間ステップを一定に保つために質量が追加される

推奨される解決策:

この問題の一般的な解決策は、ギャップと剛性を増大させた局所接触を作成することです。初期剛性を増大させると、貫通初期の時間ステップは小さくなりますが、貫通が大きくなった場合にはこの時間ステップが大きくなります。

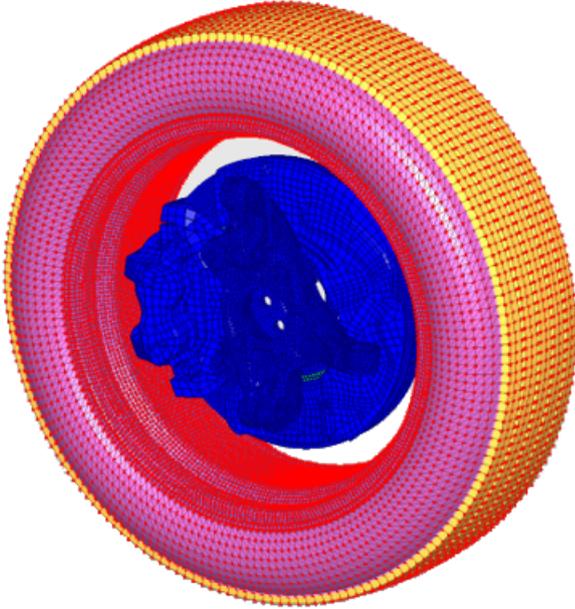


図 464: 局所接触

2つの剛体パート間の接触は、インターフェースTYPE7とTYPE11またはTYPE19を使用して実現できます。主な問題は、この接触で深い貫通が生じることです。その結果として、時間ステップを/DT/NODA/CSTまたは/DT/NODA/CST2で指定された値に保つために質量が追加される可能性があります。

このタイプの問題を解決するには、次の2つの解決策があります:

- 2つのパートのうち少なくとも1つを可変形パートに切り替えます。
- ギャップと剛性を増大させた局所接触を追加します。

MASS OR ENERGY ERROR DUE TO HIGH DISTORTION

```
***  NODES WITH HIGHEST VELOCITY
***  NODES WITH HIGHEST MASS CHANGE
```

概要:

非常に大きな塑性変形が生じている場合は、シミュレーションが不安定になり、エネルギーエラーまたは質量エラーが原因でシミュレーションが失敗し、ERROR終了する可能性があります。

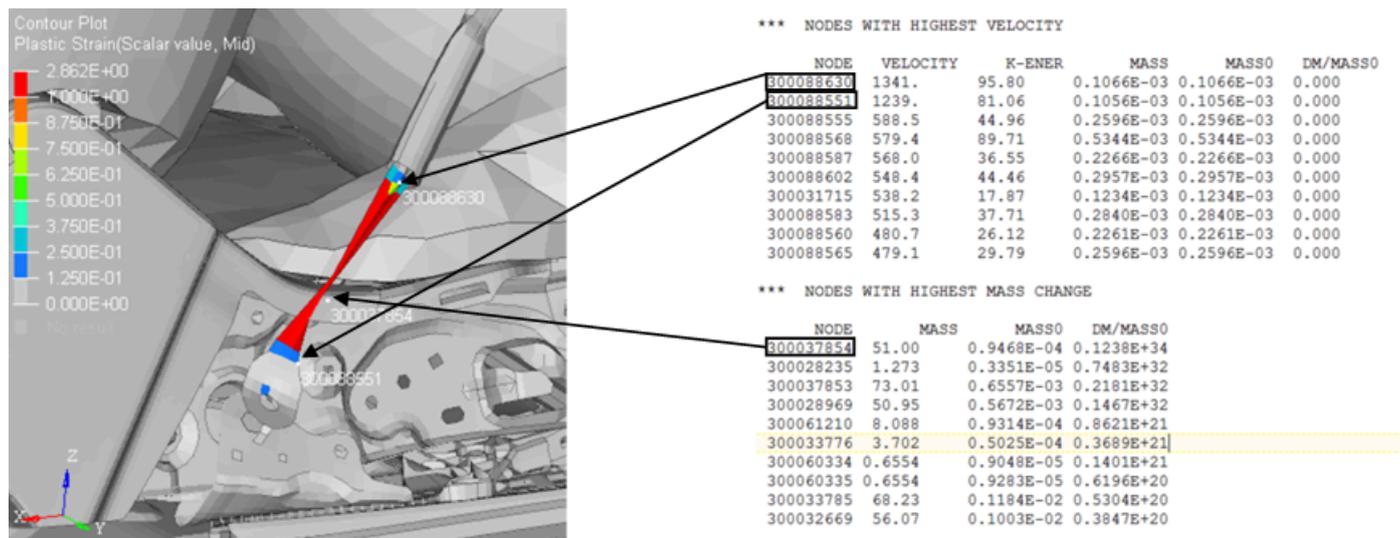


図 465:

推奨される解決策:

結果に基づいて、この問題を解決する方法がいくつか存在します:

- 適切なひずみ破壊を定義します。
- 材料が正しくないか(単位系)、不適切なタイプ(鋼鉄の代わりにプラスチックが使用されている、降伏点が低すぎるなど)の可能性ががあります。

```
62100 18.85 0.2985E-03 SOLID 230440718 -1.3% 0.3484E+5 0.1317E+06 109.7 1523.
RUPTURE OF SOLID ELEMENT NUMBER 230025198
DELETE CONNECTION SOLID ELEMENT 110010956, ENERGY= 4.732011155E-05
RUPTURE OF SOLID ELEMENT NUMBER 230024559
** WARNING MINIMUM TIME STEP 0.5975E-05 IN INTERFACE NB 2300040(DTMIN= 0.1000E-04)
SECONDARY NODES NB 230373002 230373019
MAIN NODES NB 230373003 230373004
DELET SECONDARY LINE FROM INTERFACE
```

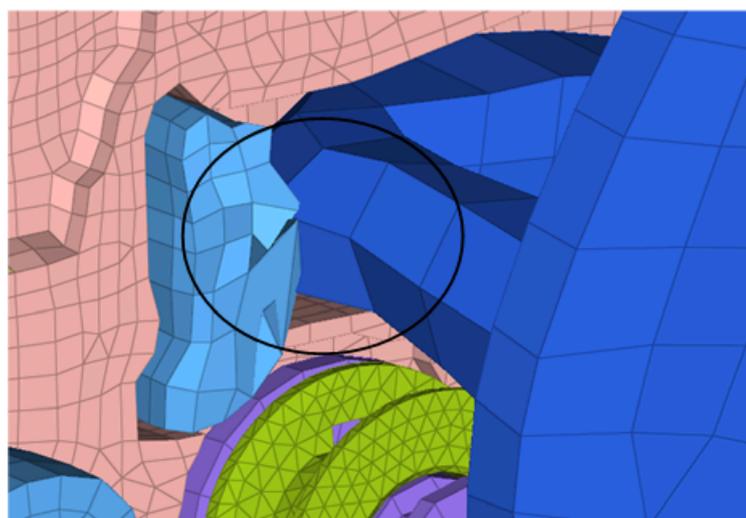


図 466:

初期状態で、局所歪みを引き起こす交差が生じています。この問題を解決するには、この交差を修正して、適切なひずみ破壊を材料内で定義してください。

RIGID BODY BECOMES UNSTABLE

```

WARNING ID :          542
** WARNING RIGID BODY INERTIA
DESCRIPTION :
-- RIGID BODY ID : 713264
-- RIGID BODY TITLE : NULL
UNPHYSICAL INERTIA :
PRINCIPAL INERTIA 150.0050404753 IS GREATER THAN THE SUM
OF THE 2 OTHER ONES 0.60340391378794E-02 + 0.3645995262784E-02

```

概要:

剛体の慣性が物理的でない場合、剛体は不安定になる可能性があります。剛体の慣性が物理的でない場合、RadiossはStarter内で警告を表示します。

それらの警告を修正しないと、以下の問題が発生する可能性があります:

- 剛体が不安定になり、その状態が車両内で非常に高速に進展します。
- 剛性セカンダリ節点は全体接触内に引き続き存在し、非現実的な変形を引き起こします。
- 衝突速度が非常に速いため(1500m/s超)数値上の問題が発生します。

推奨される解決策:

物理的でない剛体の慣性を修正します。

NEGATIVE INERTIA OR STIFFNESS

```

NEGATIVE INERTIA ON NODE ID=823767293

```

概要:

一般にこの問題は、最近のバージョン(2017.x)よりもRadioss v12.xで多く発生します。この問題が発生するのは、インターフェースTYPE2の節点が最も近いメインセグメントの外に投影される場合です。このエラーは、メインセグメントに対するセカンダリ節点の高さとは関係なく、その投影がメインセグメントの外側になることに関連します。

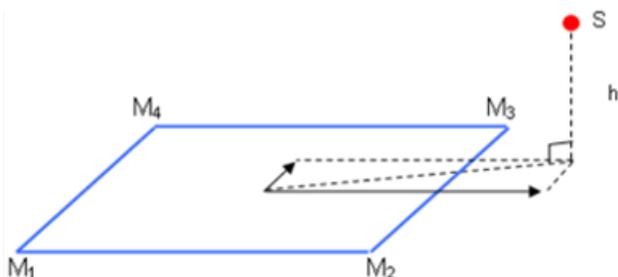


図 467:

メインセグメントの外に投影される節点について、Starter内で警告が表示されます。

```

WARNING ID:          345
** WARNING : CHECK TIED INTERFACE
DESCRIPTION :
-- INTERFACE ID : 557392358
-- INTERFACE TITLE : CONNECTION.37
8238684 2 823767497 823767293 823767296 823767504 -1.279664112565 -0.9934883789504 0.7066172931858

```

HyperCrashのモデルチェッカーを使用して、“Secondary nodes no proj.”を確認してください。これにより、最も近いメインセグメントの外に投影される節点を特定できます。

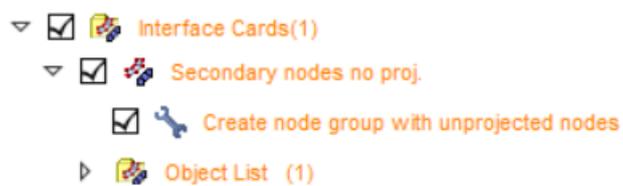


図 468:

推奨される解決策:

この問題を解決するには、以下のようないくつかの方法があります:

- インターフェイスTYPE2から最も近いメインセグメントの外に投影される節点を削除します。
- それらの節点を平行移動して、このセグメントの外に投影されないようにします。

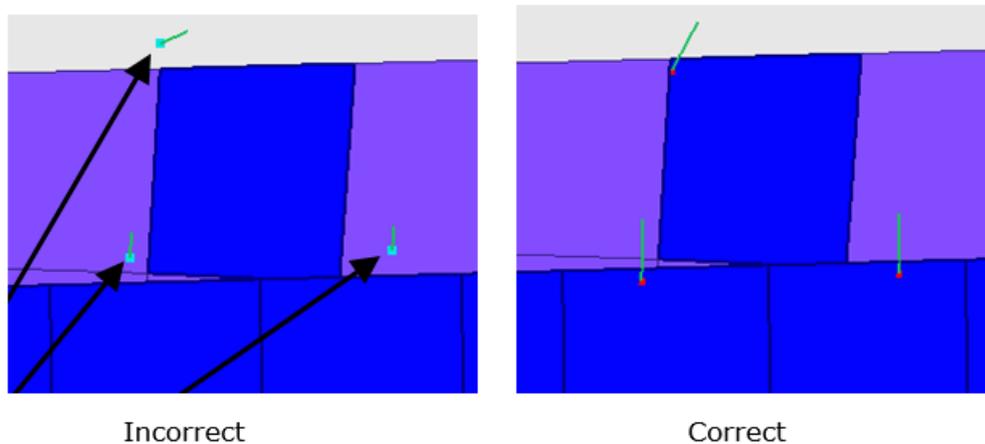


図 469:

警告メッセージデータベース

ここでは、警告メッセージを小さい番号から順に示します。

100～699

警告194

```
WARNING ID :          194
** WARNING IN HIERARCHY REFERENCE
DESCRIPTION :
-- SURFACE ID : 8300005857
-- INTER_group_830006186_of_PART_TITLE : PART
REFERENCE TO UNEXISTING ID=600000000
```

概要:

Starterがこのメッセージを出力するのは、オブジェクト(節点、要素、パート、サブセット)が、節点、要素、サーフェス、またはラインのグループで定義されているが、モデル内には存在しない場合です。

上記の例で、パートID 600000000はサーフェス830005857で定義されていますが、モデル内に存在しません。参照されているがモデル内で定義されていないオブジェクトは、HyperCrashのModelブラウザに“Unresolved IDs”として表示されます。



図 470:

推奨される解決策:

このグループを削除するか、オブジェクトを選択してグループを再定義します。

警告542

```
WARNING ID :          542
** WARNING RIGID BODY INERTIA
DESCRIPTION :
-- RIGID BODY ID : 136849917
-- RIGID BODY TITLE : MAT_RIGID_1500016_PART_325
UNPHYSICAL INERTIA :
PRINCIPAL INERTIA 249.2162969709 IS GREATER THAN THEN SUM
OF THE 2 OTHER ONES 112.70695453317 + 48.42692228428
```

概要:

Starterがこのメッセージを出力するのは、慣性が物理的でない場合です。大抵、これは次の場合に発生します:

1. $I_{cog}=3$ および4の場合に、慣性が定義されているが、適切でない。
2. J_{xx} , J_{yy} , J_{zz} , J_{xy} , J_{xz} , J_{yz} に対して一定の慣性が定義されており(50)、 I_{sphere} が1に設定されていない。

この警告は、Engineの実行時に問題を引き起こす可能性があるため、修正する必要があります。この警告は、HyperCrashで修正できます。

推奨される解決策:

上記の2つ目のケースについては、HyperCrashを使用して簡単に解決できます。剛体パネルに表示されている慣性の列で、Jxx、Jyy、Jzz = 50であるすべての剛体を選択し、Jxy、Jyz、Jxz = 0に設定してください。

				Include	Master Node TH	Activation State	JXX	JXY	JXZ	JYY	JYZ	JZZ
136850154	No name		NO	result_0000.rad	NO	OFF	50	0	0	50	0	50
136850155	rigid_body_3000240		NO	result_0000.rad	NO	OFF	50	0	0	50	0	50
136850156	rigid_body_3000241		NO	result_0000.rad	NO	OFF	50	0	0	50	0	50
136850157	rigid_body_3000242		NO	result_0000.rad	NO	OFF	50	0	0	50	0	50
136850158	rigid_body_3000243		NO	result_0000.rad	NO	OFF	50	0	0	50	0	50
136850159	rigid_body_3000244		NO	result_0000.rad	NO	OFF	50	0	0	50	0	50
136850160	rigid_body_3000245		NO	result_0000.rad	NO	OFF	50	0	0	50	0	50
136850161	rigid_body_3000246		NO	result_0000.rad	NO	OFF	50	0	0	50	0	50
136850162	rigid_body_3000247		NO	result_0000.rad	NO	OFF	50	0	0	50	0	50
136850163	-----> MOVING RIGID BODY		NO	result_0000.rad	NO	OFF	0	0	0	0	0	0

RBODY (246 Entities)	
Local Unit System	None
Lagrange multipliers	<input type="checkbox"/>
Automatic master node	<input checked="" type="checkbox"/>
[MASS] Mass	####
[Jxx] JXX inertia	50
[Jyy] JYY inertia	50
[Jzz] JZZ inertia	50
[Jxy] JXY inertia	0
[Jyz] JYZ inertia	0
[Jxz] JXZ inertia	0
[ISPHER] Inertia	####
[ISENS] Sensor	None
[NSKEW] Skew	None
[KREM] Keep slave nodes in rigid wall	<input type="checkbox"/>
[ICOG] Center of gravity computation	2: Slaves only
[loptoff] Manage domain decomposition of rigid body for RADIOSS HMPP flag	0: CPU cost of elements associated with rigid body is
[lexpams] Manage connection through the rigid body between AMS and non AMS domain	0: if the rigid body overlaps the AMS and non AMS d
[Gnod_id] Slave nodes*	####

図 471:

700~1199

エラー1079

```
WARNING ID : 1079
** WARNING: CHECK TIED INTERFACE
DESCRIPTION :
-- INTERFACE ID: 1
-- INTERFACE TITLE: new Contact
CONCERNING 1 NODE(S)
SECONDARY NODE: 82 NEAREST SEGMENT : 1 MAIN NODES: 146
145 142 143
S = 1.400000000000 T = 1.160000000000 DIST = 2.9393876913398E-02
```

概要:

このメッセージは、セカンダリ節点ID 82の投影がメインセグメント外にあることを意味しますが、Radiossでは、この投影を、このセカンダリ節点の最も近いメインセグメントエッジへの移動として扱います。SとTは、局所's'および'z'方向の距離です。

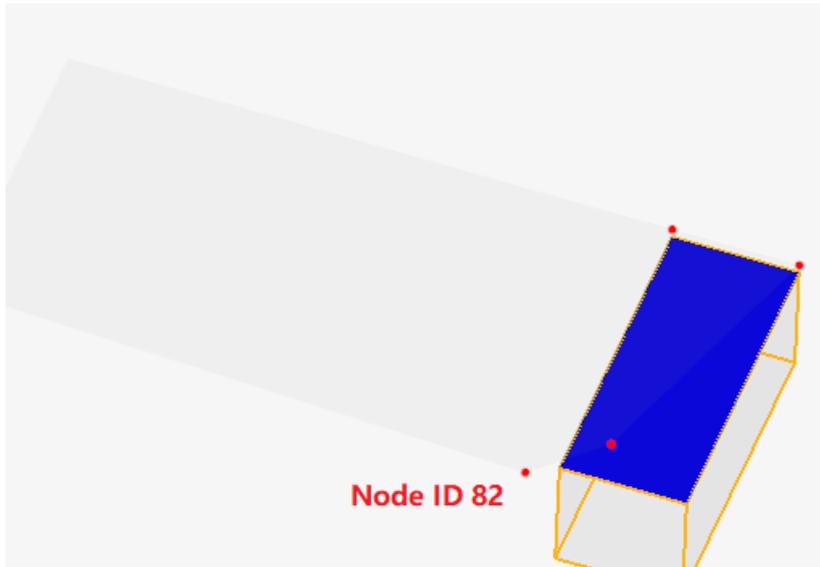


図 472:

索引

記号

- check引数 (Starter) [21](#)
- dylib [FILE] 引数(Starter) [22](#), [27](#)
- help引数
 - Engine [23](#)
 - Starter [18](#)
- HSTP_READ 引数(Starter) [21](#)
- HSTP_WRITE 引数(Starter) [21](#)
- input [file}引数
 - Engine [24](#)
 - Starter [19](#)
- mds libpath [PATH] 引数(Starter) [22](#), [27](#)
- norst引数(Engine) [26](#)
- notrap引数
 - Engine [26](#)
 - Starter [20](#)
- nspmd [spmd domain number] 引数 (Starter) [19](#)
- outfile 引数
 - Engine [26](#)
 - Starter [21](#)
- rseed (seed) 引数(Starter) [22](#)
- rxalea (xalea) 引数(Starter) [22](#)
- version引数
 - Engine [23](#)
- version数
 - Starter [18](#)
- 運動学的拘束 [296](#), [462](#)
- 共通の問題、インターフェースタイプ3と5 [318](#)
- 終了コード(Starter と Engine) [17](#)
- 表形式破壊モデル
 - /FAIL/TAB1 [225](#)
- 複数入力ファイルフォーマット、Radioss [497](#)
- 粒子法流体力学(SPH)
 - セルの分布 [471](#)
 - 対称条件 [475](#)

数字

- 2次曲面接触 [338](#)

A

- ABFファイル [494](#)
- AcuSolveとRadiossを用いた流体-構造相互作用解析 [423](#), [436](#)
- ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian)とCFD(Computational Fluid Dynamics) [444](#)
- ALE/CFD材料 [456](#)
- ALEインターフェース [463](#)

ALEキーワードのサマリー [444](#)

ALEグリッド計算 [455](#)

ALE定式化 [447](#)

appendix [412](#)

C

CADクリーニング

手法 [450](#)

CPUの割り当て

単数入力ファイルフォーマット [495](#)

複数入力ファイルフォーマット [501](#)

D

design optimization

run optimization [507](#)

E

engineファイル、陰解法解析例 [442](#)

Engine入力

ユーザーズガイド [469](#)

Euler定式化 [447](#)

F

FVMBAG1エアバッグ

stability run [378](#)

繊維空隙 [370](#)

チェックリスト [383](#)

ハウジング [374](#)

内部接触 [372](#)

FVMエアバッグのスタンドアロン実行 [381](#)

H

HILL材料 - ユーザーガイド [190](#)

L

Lagrangian定式化 [447](#)

LAW12とLAW14、複合材材料 [240](#)

Lode角、破壊 [227](#)

M

mpiおよびRadiossオプションの一貫性 [25](#)

N

nspmd [spsmd domain number] 引数(Starter) [19](#)

R

RAD2RAD出力ファイル [494](#)
RAD2RAD入力ファイルの例 [505](#)
RAD2RAD並列化 [503](#)
RadiossとAcuSolveとの間の通信 [427](#)
RadiossとAcuSolveを用いたDC-FSI [423](#), [424](#), [436](#)

S

section cutting plane, modeling tools [147](#)
section output, modeling tools [155](#)
-nthread [smp thread number] 引数
 Engine [25](#)
 Starter [20](#)
Sol2SPHパートと他のパートとの間の接触 [483](#)
Sol2SPH粒子の挙動 [481](#)
Solid to SPHオプション(Sol2SPH) [480](#)
SPEEDUP予測 [495](#)
sph、保存される隣接要素の最大数 [474](#)

あ

アドバンストマススケーリング
 推奨されるチェックリスト [52](#)
 適合性と制限事項 [49](#)
アワグラス定式化 [136](#)
あ新しいビーム要素(/PROP/INT_BEAM) [85](#)

い

陰解法ソルバー、並列バージョン、適合性 [421](#)
一貫性のない剛性、スプリング [108](#)
陰解法有限要素解析、appendix [442](#)
陰解法有限要素解析のトラブルシューティング [440](#)
陰解法構造有限要素解析 [415](#)
インターフェース エッジ間(/INTER/TYPE11) [337](#)
インターフェース ドローボード(/INTER/TYPE8) [335](#)
インターフェース 対称(/INTER/TYPE3) [316](#)
インターフェース 汎用(/INTER/TYPE7) [321](#)
インターフェース 陽解法有限要素 [313](#)
インターフェース、ALE [463](#)
インターフェース(/INTER/TYPE5) 非対称 [317](#)
インターフェースタイプ 6(/INTER/TYPE6) [320](#)
インターフェース剛性 [326](#)
インターフェース時間ステップコントロール [331](#)
インプリメンテーション、設計最適化 [506](#)
い一貫性の検証 [401](#)
い一定圧力実行 [378](#)
い一般的な推奨事項 - 時間ステップ [73](#)

い陰解法解析のアクティブ化 [419](#)
い陰解法有限要素解析 出力メッセージ [438](#)

う

運動学的条件、陰解法構造有限要素解析 [417](#)
運動条件ペナルティ法 [310](#)
う運動条件の非適合 [311](#)

え

延性破壊モデル
 /FAIL/BIQUAD [217](#)
延性破壊モデル
 /FAIL/JOHNSON [215](#)
エアバッグ、有限体積法 [362](#)
エアバッグのセットアップに関する推奨事項 [387](#)
エアバッグのモデリング
 FVMBAG1ガイドライン [353](#)
エアバッグのモデル化
 タンクテスト [384](#)
エアバッグモデリング
 デバッグ、展開 [390](#)
 モニター体積 [344](#)
 要素時間ステップコントロール [353](#)
エアバッグモデル要件 [354](#)
エアバッグ繊維材料 [357](#)
エアバッグ内の初期空気 [357](#)
エッジ間接触のロッキング [333](#)
エネルギーバランス [404](#)
エラーメッセージデータベース [511](#), [528](#)
え円筒ジョイント [305](#)
え延性材料用の破壊モデル [214](#)

お

お応力-ひずみ計算オプション - /PROP [137](#)

か

拡散ネッキング、材料の不安定性 [235](#)
荷重、陰解法の機能および互換性 [417](#)
か解析プロセス [27](#)
か回転ギアタイプジョイント [308](#)

き

基本境界条件 [460](#)
き基本的な関係式 [412](#)
き気体ジェネレーター [355](#)

く

く空間積分 [454](#)

け

計算の高速化と精度の維持 [46](#)

現時点での制限事項、単数入力ファイルフォーマット [497](#)

こ

構造FSIデータ [423](#), [436](#)

高度なマススケーリング

.outファイル例 [65](#)

金属成型例 [64](#)

自動車、例 [55](#)

剛体、/RBODY [296](#)

剛結、/RLINK [307](#)

剛壁、/RWALL [299](#)

こ 構造ダイナミクスシミュレーション - 時間ステップ [74](#)

コマンド行引数

Engine [22](#)

Starter [17](#)

コンクリート材料

/MAT/LAW10と/MAT/LAW21 [193](#)

/MAT/LAW24 [196](#)

/MAT/LAW81 [210](#)

コントロールファイル(C-ファイル) [31](#)

コンピュータークラスター [29](#)

こ異なるコア数 [30](#)

こ古典的なビーム要素(/PROP/BEAM) [85](#)

こ高度なテクニック [31](#)

こ剛性定式化 - 時間ステップ [90](#)

さ

最初のチェック 計算中 / 計算後 [404](#)

材料の不安定性、拡散ネッキング [235](#)

材料の適合性、陰解法構造有限要素解析 [416](#)

材料座標系 [142](#)

材料、陽解法構造FEA [157](#)

座標系 [139](#)

サブドメインの自動生成 [490](#)

さ参照形状 [354](#)

し

手法、運動条件適用 [310](#)

質量バランス [404](#)

初期荷重の定義 [341](#)

実行可能ファイルの直接実行 [16](#)

時刻歴ファイルアニメーションファイル [494](#)

実行、Radioss [11](#)

実行オプション

Altair Simulation script [15](#)

Compute Console [11](#)

HyperMesh [16](#)

時間ステップ、陽解法構造fea [35](#)

シェル要素

/PROP/SHELL [79](#)

じ時間ステップスケールファクター [72](#)

じ時間ステップ出力, モデルから [38](#)

じ時間積分 [454](#)

じ自己接触のギャップワーニング [335](#)

し質量の巨大な増加 [332](#)

し手法 [450](#)

じ準-圧縮性オプション [458](#)

じ準-静的解析 - 時間ステップ [75](#)

じ準-静的解析の注記事項 [432](#)

し初期貫通 [323](#)

じ人工減衰 衝撃波に対する [462](#)

じ全体時間ステップ [37](#)

す

スキューとフレーム [146](#)

スケーリング, 破壊ひずみの [231](#)

スプリング

/PROP/KJOINT [124](#)

/PROP/KJOINT2 [127](#)

/PROP/SPR_AXI [133](#)

/PROP/SPR_BEAM [120](#)

/PROP/SPR_PUL [118](#)

/PROP/SPRING [115, 116](#)

破壊 [91](#)

剛性定式化 [88](#)

スプリング type13 [120](#)

スプリング タイプ25 [133](#)

スプリング タイプ8 [116](#)

スプリング、一貫性のない剛性 [108](#)

スプリングの

座標系 [109](#)

スプリングの硬化 [97](#)

スポット溶接

ソリッド [283](#)

ボルトまたは接着結合 [279](#)

せ

設計最適化

インプリメンテーション [506](#)

環境変数の設定 [507](#)

設計最適化プロセス [508](#)

接触インターフェースの時間ステップ

コントロール [45](#)

切断面の局所座標系、モデル化ツール [150](#)

接触インターフェース - 陰解法構造有限要素解析 [417](#)

せ接触の取り扱い Lagrange乗数法 [314](#)

せ接触の取り扱い ペナルティ法 [314](#)

せ接触を伴う非線形解析 [433](#)

せ接線力の生成 [334](#)

せ節点境界条件 [459](#)

せ節点時間ステップ [36](#)

せ節点時間ステップコントロール [41](#)

せ線形ソルバー [421](#)

そ

その他のモデリングガイドライン、Sol2SPH [483](#)

ソリッド-シェル要素(/PROP/TSHELL) [78](#)

ソリッド要素、/PROP/SOLID [76](#)

た

対称条件、SPH [475](#)

単位のチェック [402](#)

単位、ALE [468](#)

タイドインターフェース(/INTER/TYPE10) [339](#)

タイド接触、/INTER/TYPE2 [303](#)

ダッシュポット - 剛性定式化 [107](#)

た多点拘束(/MPC) [308](#)

た単位系 [413](#)

た単一入力ファイルフォーマット [489](#)

た単精度計算 [34](#)

だ弾塑性区分線形材料(/MAT/LAW36) [188](#)

だ弾塑性材料 [185](#)

だ弾塑性材料 Johnson-Cook (/MAT/LAW2) [185](#)

だ断面(/SECT) [147](#)

ち

超弾性材料

/MAT/LAW42 [162](#)

/MAT/LAW62 (VISC_HYP) [166](#)

/MAT/LAW69 [168](#)

/MAT/LAW82 [170](#)

/MAT/LAW88 [173](#)

/MAT/LAW92 (Arruda-Boyce) [176](#)
Ogden [161](#)
まとめ [175](#)
超弾性材料 - Bergstrom-Boyce [180](#)
力とモーメントの計算、モデル化ツール [151](#)
超弾性材料 - /MAT/LAW92 (Yeoh) [179](#)
チェックポイントファイル [33](#)
ち超弾性材料 [160](#)
ち力とモーメント - スプリング剛性 [88](#)

て

ディファレンシャルギアジョイント [308](#)
データ出力、単数入力ファイルフォーマット [494](#)
データ入力
 単数入力ファイルフォーマット [493](#)
 複数入力ファイルフォーマット [501](#)
デバッグガイドライン
 モデルのデバッグ [406](#)
 計算チェック [404](#)
 単位の一貫性 [399](#)
デバッグのガイドライン
 モデルチェック [404](#)
 モデル化の計装 [403](#)
 モデル準備 [394](#)
て適用分野 [353](#)

と

ドメイン間のコミュニケーション - 単一入力ファイルフォーマット [490](#)
ドメイン間の結合、複数入力ファイルフォーマット [498](#)
ドメイン間の接触、複数入力ファイルフォーマット [499](#)
ドラッカーの条件の安定性チェック [171](#)
トラブルシューティング
 ALE/CFD [469](#)
トラブルシューティング、陰解法FEA [440](#)

ね

熱解析、陰解法解析 [417](#)
ね熱交換 [330](#)

は

破壊、陽解法構造有限要素解析 [214](#)
バランス エネルギー [404](#)
バランス モーメント [404](#)
バランス 質量 [404](#)
は破断インターフェース [335](#)
は排気および繊維空隙のアクティブ化 [372](#)

ひ

ひ非線形ソルバー [422](#)

ひ非線形陰解法解析の注記事項 [433](#)

ふ

複合材特性

 シェル要素 [253](#)

複合材材料

 LAW12とLAW14 [240](#)

複合材プロパティソリッド要素 [264](#)

不正な体積の排除 [383](#)

複合材

 LAW19とLAW58 [250](#)

 LAW25 (Tsai-WU and CRASURV) [246](#)

 モデリング [252](#)

 特性 [253](#)

 破壊モデル [266](#)

複数コアの使用 [29](#)

フィルタリング、appendix [414](#)

プーリー スプリング TYPE12 [118](#)

プレロード

 ボルトテンショニング [340](#)

ふ複数のengineファイル [32](#)

へ

ベントホール [367](#)

ほ

ボルトテンショニング [340](#)

ボルトのモデル化 衝突 [292](#)

ま

マルチドメイン

 モデルの設定 [487](#)

マルチドメインテクニク [485](#)

マルチドメイン解析の起動

 マルチドメイン入力ファイルフォーマット [502](#)

 単一入力ファイルフォーマット [495](#)

ま摩擦 [327](#)

め

メイン側とセカンダリ側の選択 - 流体 / 流体インターフェース [464](#)

メッシュに関する推奨 [133](#)

メッシングと折りたたみ [354](#)

も

モーメントバランス [404](#)

モデリングガイドライン、Sol2SPH [483](#)

モデリングツール、スキューとフレーム [146](#)

モデルサイズ、複数のコア [30](#)

モデルの設定

マルチドメイン [487](#)

単数入力ファイルフォーマット [489](#)

複数入力ファイルフォーマット [497](#)

モニター体積

AIRBAG1タイプ [345](#)

COMMU1タイプ [349](#)

FVMBAG1タイプ [351](#)

GASタイプ [352](#)

LFLUIDタイプ [352](#)

PRESタイプ [352](#)

モニター体積時間ステップ [353](#)

も最も代表的な単位系 [402](#)

や

ヤコビアンマトリックス [133](#)

や柔らかいパート 硬いパートに対する [332](#)

ゆ

ゆ有限要素 [76](#)

よ

要素オプション

ガイドライン [84](#)

要素 ソリッド-シェル [78](#)

要素 ソリッド [76](#)

要素時間ステップ

コントロール [44](#)

陽解法構造有限要素解析 [35](#)

要素定式化、陰解法構造有限要素解析 [416](#)

要素破壊処理 [233](#)

ら

ラックアンドピニオンジョイント [308](#)

ら乱流壁 [458](#)

り

理論的な速度上昇、マルチドメインテクニック [486](#)

流体 / 構造連成相互作用(ALE/Lagrangeインターフェース) [466](#)

流体と流体-構造シミュレーション [444](#)

り流体 / 構造結合 [450](#)

り粒子法流体力学(SPH) [471](#)

わ

ワークステーション

単体 [29](#)

複数 [30](#)